



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO

TÍTULO:
REPOTENCIACIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DEL LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES PID Y FUZZY A TRAVÉS DE MATLAB/SIMULINK

AUTORES:
JARA LOAIZA WILLIAM ANDRÉS
CHALACÁN AGUAYO VICENTE DANIEL

TUTOR:
MSC. VICENTE PEÑARANDA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2019

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Nosotros, WILLIAM ANDRÉS JARA LOAIZA y VICENTE DANIEL CHALACÁN AGUAYO, estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana, certificamos que los conceptos desarrollados, análisis realizado, y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, septiembre del 2019

William Andrés Jara Loaiza

C.I.: 0926210634

Vicente Daniel Chalacán Aguayo

C.I.: 0940433519

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS

A través del presente certificado, se ceden los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de la propiedad intelectual y por su normatividad institucional vigente.

Guayaquil, septiembre del 2019

William Andrés Jara Loaiza

C.I.: 0926210634

Vicente Daniel Chalacán Aguayo

C.I.: 0940433519

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Msc. Vicente Avelino Peñaranda Idrovo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“REPOTENCIACIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DEL LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES PID Y FUZZY A TRAVÉS DE MATLAB/SIMULINK”** realizado por los estudiantes, **WILLIAM ANDRÉS JARA LOAIZA** con cédula de identidad N.º 0926210634 y **VICENTE DANIEL CHALACÁN AGUAYO** con cédula de identidad N.º 0940433519, obteniendo un producto que cumple con los objetivos del diseño de aprobación, informe final y demás requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Guayaquil, septiembre del 2019

Msc. Vicente Avelino Peñaranda Idrovo

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a mis padres Vicente Chalacán y Lola Aguayo, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres. A mis hermanas Natalia Chalacán, Maria Chalacán y Nadia Chalacán por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida. A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

VICENTE DANIEL CHALACÁN AGUAYO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a mis padres Willan Amado Jara Leon y Blanca Piedad Loaiza Pacheco por ser la mayor motivación de avanzar y crecer tanto profesionalmente, como en la vida personal. A mi hermana Lady Brigitte Jara Loaiza para que este trabajo sirva como influencia y motivación en ella, que llegue a tal sitio y mucho más en su futura carrera profesional.

A cada una de las personas que dieron su ayuda, amigos, conocidos, profesores, compañeros de trabajo, ya que con esto se logró concluir el arduo trabajo que implicó la investigación y construcción de todo el proyecto.

WILLIAM ANDRÉS JARA LOAIZA

AGRADECIMIENTO

Agradecemos principalmente a Dios por darnos la vida y a nuestros padres por darnos su apoyo incondicional. A todas y cada una de las personas que nos dieron su granito de arena con ideas, tiempo y trabajo para que este proyecto sea una realidad y logremos conseguir nuestro título profesional.

Al Msc. Vicente Peñaranda por su guía oportuna y concisa.

Al Msc. Víctor Huilcapi por su acertada dirección en nuestra carrera.

VICENTE DANIEL CHALACÁN AGUAYO

WILLIAM ANDRÉS JARA LOAIZA

RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DE PROYECTO	TEMA DE PROYECTO DE TITULACIÓN
2019	CHALACÁN AGUAYO VICENTE DANIEL JARA LOAIZA WILLIAM ANDRÉS	MSC. VICENTE PEÑARANDA	“REPOTENCIACIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DEL LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES PID Y FUZZY A TRAVÉS DE MATLAB / SIMULINK”

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo realizar una guía de prácticas del funcionamiento de la plataforma inercial de dos grados de libertad utilizando controladores PID y FUZZY, con ayuda del entorno de programación Simulink, que funciona sobre el software Matlab. La plataforma se encuentra ubicada en el laboratorio de control automático del bloque ‘E’ de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario y se enfoca en reforzar el aprendizaje práctico de los controladores antes mencionados. Para esto se tiene como referencia la documentación con el tema “*Diseño e implementación de una plataforma inercial de dos grados de libertad y evaluación del modelado matemático a través de Matlab/Simulink*” realizada en el año 2015. En el mencionado documento se encuentra el diseño, construcción y modelado de la plataforma inercial de dos grados de libertad.

A partir del análisis ejecutado sobre el diseño propuesto en el año 2015, se puede describir la plataforma con los siguientes elementos: motores reductores DC con encoder, pantalla táctil resistiva, mecanismo con distribución de pesos para el movimiento del plato donde se aloja la pantalla táctil, acelerómetro analógico, microcontroladores, fuentes de poder, tarjeta electrónica puente H para control de los motores, tarjeta de circuito impreso o PCB para conexión de todos los elementos y una tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 como medio de comunicación entre la plataforma inercial y el software Matlab/Simulink. Considerando la existencia de nuevos recursos electrónicos, se efectúa una reingeniería a la propuesta del 2015 que condujo a las siguientes mejoras: los dos motores reductores DC con encoder, son reemplazados por dos servomotores como actuadores en el sistema, por ende, la tarjeta electrónica puente H queda sin uso. La pantalla táctil resistiva se reemplaza

por el mismo modelo, aunque con un mejor terminal de conexión. Esta pantalla en conjunto con una placa arduino NANO son utilizados como sensor para obtener las coordenadas del cuerpo útil (esfera) en el plato.

El mecanismo para el plato, se lo rediseña agregando un pilar base en el centro con un rodamiento tipo rotula, el cual permite libre movimiento. En conjunto con esto, se agregan dos brazos articulados que transforman el movimiento angular de los servomotores a movimiento lineal para el eje X y el eje Y. Se decide cambiar las tarjetas PCB y PCI-1711 por una placa arduino DUE que, al ser un elemento muy usado en la electrónica actual, disminuye el costo del proyecto, facilita el control del sistema y la comunicación con los elementos (sensor y actuadores) se vuelve más sencilla. Además, se instaló una etapa eléctrica de potencia para el encendido y apagado del sistema con, un botón de paro, un botón de marcha y un botón tipo hongo para el paro de emergencia. La comunicación entre la plataforma inercial de dos grados de libertad y el computador se realiza mediante la placa arduino DUE que permite el control del movimiento en los servomotores y la lectura de las coordenadas de la pantalla táctil mediante Matlab/Simulink. La comunicación entre el arduino DUE y la pantalla táctil se realiza con un programa desarrollado en la placa arduino NANO.

Para el diseño de los controladores es fundamental trabajar en el modelado matemático de la planta, la identificación se realiza empleando la herramienta “Sistema de identificación” (systemIdentification o ident) propia del software Matlab. Gracias a la adquisición de datos de la plataforma y procesamiento de dichos datos, se obtiene las funciones de transferencia que nos indica y describe el funcionamiento de todo el sistema. Se obtiene las funciones de transferencia por separado en cada eje, facilitando la identificación y por ende el control de la planta. De esta forma se tiene un sistema MIMO (**M**ultiple-**I**nput **M**ultiple-**O**utput) general en el que su control incluye la función de transferencia para el eje X y una segunda función de transferencia para el eje Y, por motivos que se detallan en este trabajo, el sistema general se separa en dos sistemas SISO (**S**ingle-**I**nput **S**ingle-**O**utput) uno por cada eje que trabajan en conjunto para el equilibrio de la esfera.

Palabras Clave: *Controladores, PID, FUZZY, Plataforma Inercial, Grados de Libertad, Software Matlab, Entorno de programación Simulink, Arduino, Pantalla táctil resistiva, Servomotor, tarjeta PCB, tarjeta PCI-1711, arduino DUE, arduino NANO, SISO, MIMO.*

ABSTRACT

YEAR	STUDENTS	PRJ. DIRECTOR	SUBJECT
2019	CHALACÁN AGUAYO VICENTE DANIEL JARA LOAIZA WILLIAM ANDRÉS	MSC. VICENTE PEÑARANDA	“REPOTENTIATION OF THE INERCIAL PLATFORM OF THE AUTOMATIC CONTROL LABORATORY USING PID AND FUZZY CONTROLLERS THROUGH MATLAB / SIMULINK”

This paper aims to develop a practice guide for the operation of the inertial platform of two degrees of freedom using PID and FUZZY controllers, with the help of the Simulink programming environment, which works on Matlab software. The platform is located in the automatic control laboratory of the ‘E’ block of the Universidad Politecnica Salesiana in Guayaquil and focuses on strengthening the practical learning of the aforementioned controllers. For this we have as reference the documentation with the theme *“Design and implementation of an inertial platform of two degrees of freedom and evaluation of mathematical modeling through Matlab / Simulink”* carried out in 2015. In the mentioned document is the design, construction and modeling of the inertial platform with two degrees of freedom.

From the analysis carried out on the design proposed in 2015, the platform can be described with the following elements: DC reduction motors with encoder, resistive touch screen, mechanism with weight distribution for the movement of the plate where the touch screen is housed , analog accelerometer, microcontrollers, power sources, electronic bridge H card for motor control, printed circuit board or PCB for connection of all elements and a PCI-1711 data acquisition card as a means of communication between the inertial platform and Matlab / Simulink software. Considering the existence of new electronic resources, a reengineering was carried out on the 2015 proposal which led to the following improvements: the two DC reduction motors with encoders, are replaced by two servomotors as actuators in the system, therefore, the H bridge electronic card is left unused. The resistive touch screen is replaced by the same model, although with a better connection terminal. This screen together with an Arduino NANO plate are used as a sensor to obtain the coordinates of the useful body (sphere) on the plate.

The mechanism for the plate is redesigned by adding a base pillar in the center with a ball-type bearing, which allows free movement. Along with this, two articulated arms are added that transform the angular movement of the servomotors to linear motion for the X axis and the Y axis. It was decided to change the PCB and PCI-1711 cards for an Arduino DUE board which, being an element widely used in current electronics, it reduces the cost of the project, facilitates system control and communication with the elements (sensor and actuators) becomes easier. In addition, an electric power stage was installed for switching the system on and off with a stop button, a start button and a mushroom button for emergency stop. The communication between the inertial platform of two degrees of freedom and the computer is carried out by means of the Arduino DUE board that allows the control of the movement in the servo motors and the reading of the coordinates of the touch screen by means of Matlab / Simulink. The communication between the Arduino DUE and the touch screen is done with software developed on the NANO Arduino board.

For the design of the controllers it is essential to work on the mathematical modeling of the plant, the identification is carried out using the "System Identification" toolbox (system Identification or ident) of the Matlab software. Thanks to the acquisition of data from the platform and the processing of said data, the transfer functions that describe the operation of the entire system are obtained. The transfer functions are obtained separately on each axis, facilitating the identification and therefore the control of the plant. In this way, there is a general MIMO (**M**ultiple-**I**nput **M**ultiple-**O**utput) system in which its control includes the transfer function for the X axis and a second transfer function for the Y axis, for reasons detailed in this work, the general system is separated into two SISO systems (**S**ingle-**I**nput **S**ingle-**O**utput) one for each axis that work together to balance the sphere.

Keywords: *Controllers, PID, FUZZY, Inertial Platform, Degrees of Freedom, Matlab Software, Simulink programming environment, Arduino, Resistive touch screen, Servomotor, PCB card, PCI-1711 card, arduino DUE, arduino NANO, SISO, MIMO.*

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	X
ÍNDICE GENERAL	XII
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXVI
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL PROBLEMA	2
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Importancia y alcance.....	2
1.4 Delimitación.....	3
1.4.1 Temporal.....	3
1.4.2 Espacial	3
1.4.3 Académico	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo General	4
1.5.2 Objetivos Específicos.....	4
2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Sistemas inerciales.....	5
2.2 Plataforma Inercial.....	5
2.2.1 Grados de Libertad	5
2.3 Servomotores	6
2.3.1 Partes de un servomotor.....	7
2.4 Panel Táctil Resistivo	8
2.4.1 Panel táctil resistivo de 4 cables	9
2.5 Tarjeta de circuito impreso o PCB	10
2.5.1 Relé o Relevador	11
2.5.2 Borneras y Espadines	11

2.5.3	Filtro RC Pasa bajo	12
2.6	Modulación por ancho de pulso o PWM	13
2.6.1	Cómo funciona la modulación por ancho de pulso	13
2.6.2	Ciclo de trabajo o Duty Cycle	14
2.6.3	Usos para la señal PWM.....	15
2.7	HARDWARE Y SOFTWARE - ARDUINO.....	16
2.7.1	ARDUINO NANO	16
2.7.2	ARDUINO DUE	17
2.7.3	Software de arduino	21
2.8	Matlab	22
2.9	Simulink.....	23
2.10	Control PID.....	23
2.10.1	Signo de referencia y señal de error	23
2.10.2	Control Proporcional.....	24
2.10.3	Control Derivativo	24
2.10.4	Control Integral.....	25
2.11	Control FUZZY	26
2.11.1	Etapas del control FUZZY	26
2.11.2	Interfaz de fuzzificación	26
2.11.3	Base de conocimiento o Conjunto de reglas y Lógica de decisiones	27
2.11.4	Interfaz de defuzzificación	28
2.12	Diseño de Controladores	28
2.12.1	Diseño de Controladores P, PI, PID.....	28
2.12.2	Diseño de Controladores FUZZY.....	30
3.	MARCO METODOLÓGICO	33
3.1	Diagnóstico de la Plataforma de 2-GDL.....	33
3.1.1	Estructura Mecánica	33
3.1.2	Motores Reductores DC con Encoder	34
3.1.3	Pantalla táctil Resistiva	35
3.1.4	Acelerómetro.....	36
3.1.5	Tarjeta PCI.....	36
3.1.6	SparkFun	36
3.1.7	PCB (Tarjeta de Circuito Impreso)	37
3.1.8	Fuentes de Voltaje	38
3.2	Ejecución de la Repotenciación.....	39
3.3	Diseño e Implementación de los Algoritmos de Control PID y Fuzzy	43
3.3.1	Pantalla Táctil Resistiva y controlador.....	44

3.3.2	Servomotores.....	49
3.3.3	Arduino DUE	52
3.3.4	Identificación de la Planta	53
3.3.5	Identificación de la Planta en el eje X.....	59
3.3.6	Identificación de la Planta en el eje Y.....	65
3.4	Diseño del Algoritmo PID.....	71
3.4.1	Diseño del Algoritmo PID en el eje X.....	72
3.4.2	Diseño del Algoritmo PID en el eje Y.....	78
3.5	Diseño del Algoritmo FUZZY	85
3.5.1	Diseño del Algoritmo FUZZY en el eje X	87
3.5.2	Diseño del Algoritmo FUZZY en el eje Y	92
4.	GUÍAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	98
4.1	PRÁCTICA # 1	98
4.2	PRÁCTICA # 2	107
4.3	PRÁCTICA # 3	112
4.4	PRÁCTICA # 4	117
4.5	PRÁCTICA # 5	127
4.6	PRÁCTICA # 6	137
4.7	PRÁCTICA # 7	149
4.8	PRÁCTICA # 8	162
4.9	PRÁCTICA # 9	175
	RESULTADOS	192
	ANÁLISIS DE RESULTADO.....	199
	CONCLUSIONES.....	201
	RECOMENDACIONES.....	202
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	203
	ANEXOS	207
ANEXO 1:	TABLAS DE DATOS GENERADOS DE LA SEÑAL PRBS	207
ANEXO 2:	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	212
ANEXO 3:	PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	213
ANEXO 4:	FACTURAS DE EQUIPOS Y ELEMENTOS VARIOS	213
ANEXO 5:	DATASHEET PANTALLA TACTIL RESISTIVA.....	215

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

PID	Tipo de controlado Proporcional Integral Derivativo
FUZZY	Tipo de controlado basado en lógica difusa
SISO	Single-Input Single-Output
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
PCB	Printed Circuit Board
PCI-1711	Tarjeta Multifunción para el bus PCI
2-GDL	2-Grados de Libertad
NANO	Modelo de Placa Arduino para desarrollos de tamaño compacto.
DUE	Modelo de Placa Arduino para desarrollos de tamaño compacto.
PWM	Pulse Width Modulation
LED	Light Emitting Diode
ATMEGA328	Chip microcontrolador creado por Atmel
ATSAM3X8E	Chip microcontrolador creado por Atmel
CPU	Central Processing Unit
Memoria SRAM	Static Random Access Memory
DMA	Direct Memory Access
SAM3X	Microcontrolador basado en memoria flash
Memoria ROM	Read Only Memory
MCU	Microcontroller Unit
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
TTL	Transistor to Transistor Logic
ATMEGA16U2	Microchip de alto rendimiento y bajo consumo.
ARDUINO IDE	Software de código abierto de Arduino

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos generados de la señal PRBS-Motor X.....	55
Tabla 2: Datos generados de la señal PRBS-Motor Y.....	56
Tabla 3: Reglas de correspondencia.....	89
Tabla 4: Comparativa del error RMS e índices de desempeño.....	198
Tabla 5: Datos generados de la señal PRBS-Motor X.....	209
Tabla 6: Datos generados de la señal PRBS-Motor Y.....	216

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Grados de libertad en la visión de una persona.	6
Figura 2. 2: Servomotor DC y Servomotor AC.	6
Figura 2. 3: Variación de ángulos en el servomotor de acuerdo a su señal PWM.	7
Figura 2. 4: Partes de un servomotor DC.	8
Figura 2. 5: Conector del servomotor con sus 3 cables, Vcc, GND y Señal.	8
Figura 2. 6: Pantalla táctil de vidrio o touch panel, compuesta de varias capas.	9
Figura 2. 7: Distribución de pines de conexión para el panel táctil resistivo	9
Figura 2. 8: Arreglo de resistencias en el panel táctil resistivo.	10
Figura 2. 9: Tarjeta de circuito impreso.	11
Figura 2. 10: Mecanismo de un relé y relé tipo electromagnético.	11
Figura 2. 11: Borneras, espadines hembra y espadines macho.	12
Figura 2. 12: Circuito RC y su gráfica en función de la frecuencia.	12
Figura 2. 13: Porcentajes diferentes del ciclo de trabajo en la señal PWM.	13
Figura 2. 14: Ciclo de trabajo del 90% en la señal PWM.	14
Figura 2. 15: Ciclo de trabajo del 20% en la señal PWM.	15
Figura 2. 16: Control de brillo en un diodo LED con la señal PWM.	15
Figura 2. 17: Tarjeta Arduino NANO.	16
Figura 2. 18: Diagrama pines del Arduino NANO.	17
Figura 2. 19: Puertos de programación en Arduino DUE.	18
Figura 2. 20: Diagrama pines del Arduino DUE.	19
Figura 2. 21: Menús y opciones del software arduino IDE.	21
Figura 2. 22: Logo de software Matlab/Simulink.	22
Figura 2. 23: Sistema de control en lazo cerrado con control PID.	23
Figura 2. 24: Efectos en la señal modificando parámetros K_p , K_d , K_i	25
Figura 2. 25: Sistema de control difuso Mamdani.	26
Figura 2. 26: Funciones de membresía más usadas en los controladores difusos.	27
Figura 2. 27: Lógica de decisiones de un controlador difuso.	27
Figura 2. 28: Bloque "PID" en un sistema de lazo cerrado de Simulink.	28
Figura 2. 29: Parámetros del bloque "PID Controller".	29
Figura 2. 30: Herramienta de sintonización de PID en el bloque "PID Controller".	29
Figura 2. 31: Ejecución del comando "fuzzy" en la ventana de comandos Matlab.	30
Figura 2. 32: Ventana para editar las funciones de membresía.	30
Figura 2. 33: Ventana para editar el conjunto de reglas.	31
Figura 2. 34: Ventanas para probar y visualizar el efecto del controlador difuso.	31

Figura 2. 35: Bloque “FUZZY” en un sistema de lazo cerrado de Simulink.	32
Figura 2. 36: Paramento “FIS name” del bloque FUZZY Logic Controller.	32
Figura 3. 1: Plataforma Inercial 2-GDL, vista frontal.....	33
Figura 3. 2: Plataforma Inercial 2-GDL, acoples.....	33
Figura 3. 3: Tornillos de acoples dañados.....	34
Figura 3. 4: Diagnóstico de los motores reductores dc con encoder.	34
Figura 3. 5: Diagnóstico de pantalla táctil resistiva.....	35
Figura 3. 6: Conector pantalla táctil resistiva.....	35
Figura 3. 7: Acelerómetro, vista de los pines.	36
Figura 3. 9: Tarjeta PCI.....	36
Figura 3. 10: Tarjeta SparkFun.	37
Figura 3. 11: Pistas de la tarjeta PCB, vista posterior.	37
Figura 3. 12: Tarjeta PCB, vista superior.	38
Figura 3. 13: Fuente de 12vdc/5Amp.....	38
Figura 3. 14: Fuente de 12vdc/30Amp.....	39
Figura 3. 15: Diseño de la Proforma Inercial 2-GDL, vista isométrica-	39
Figura 3. 16: Medida en centímetros de la Proforma Inercial 2-GDL.....	40
Figura 3. 17: Ubicación de los servomotores con sus brazos y el pilar base.....	40
Figura 3. 18: Servomotor marca Fan Model.....	41
Figura 3. 19: Pantalla Táctil Resistiva.	41
Figura 3. 20: Tarjeta Arduino DUE.....	42
Figura 3. 21: Ubicación de los botones del control físico.....	42
Figura 3. 22: Rediseño de la Proforma Inercial 2-GDL.....	43
Figura 3. 23: Diagrama de bloques del sistema de control en el Eje X.....	44
Figura 3. 24: Diagrama de bloques del sistema de control en el Eje Y.....	44
Figura 3. 25: Diagrama de bloques del sistema de control.....	44
Figura 3. 26: Dimensiones de la pantalla táctil.....	45
Figura 3. 27: Diagrama de conexiones para la obtención de la posición.....	46
Figura 3. 28: Microcontrolador Arduino NANO.....	48
Figura 3. 29: Diseño del filtro Pasa bajo.	48
Figura 3. 30: Señal PWM filtrado con Pasa Bajo.....	49
Figura 3. 31: Servomotor marca Fan Model.....	50
Figura 3. 32: Librería de Arduino para Simulink.	51
Figura 3. 33: Bloques de la librería de Arduino instalada en Matlab-.....	51
Figura 3. 34: Característica del bloque Standard Servo Write.....	52
Figura 3. 35: Tarjeta PBC para la actuación de la Plataforma Inercial de 2-GDL. ..	53
Figura 3. 36: Señal PRBS Servomotor X.	56

Figura 3. 37: Señal PRBS Servomotor Y.	57
Figura 3. 38: Diagrama de bloques de eje X utilizando los datos del sensor.....	57
Figura 3. 39: Filtrado Kalman.....	58
Figura 3. 40: Algoritmo de Control Conocido para el Eje X.	59
Figura 3. 41: Ident, sentencia escrita en el comando de Matlab.....	60
Figura 3. 42: Estructura del Toolbox Ident.	60
Figura 3. 43: Ingreso de datos en el Toolbox Ident en el eje X.....	61
Figura 3. 44: Importación de datos-ident en el eje X.	61
Figura 3. 45: Procesamiento de señal-Rango en eje X.	62
Figura 3. 46: Selección del rango de operación para la identificación de la señal. .	62
Figura 3. 47: Rango para realizar la identificación del servomotor X.....	63
Figura 3. 48: Procesamiento de identificación de la planta utilizando ident.	63
Figura 3. 49: Gráfico de identificación con su respectivo porcentaje de error.....	64
Figura 3. 50: Algoritmo del Control Conocido para el Eje Y.	65
Figura 3. 51: Ingreso de datos en el Toolbox Ident en el eje Y.....	67
Figura 3. 52: Importación de datos-ident.....	67
Figura 3. 53: Procesamiento de señal-Rango.	68
Figura 3. 54: Rango de operación para la identificación de la señal.....	68
Figura 3. 55: Rango seleccionado para la identificación del servomotor Y.....	69
Figura 3. 56: Procesamiento de la identificación de la planta en el eje Y.	69
Figura 3. 57: Identificación con su respectivo porcentaje de error para el eje Y.	70
Figura 3. 58: Diagrama de control lógico PID en la plataforma inercial de 2-GDL. .	71
Figura 3. 59: Respuesta a una señal escalón del eje X.....	72
Figura 3. 60: Valores de la función de transferencia.	73
Figura 3. 61: Planta del Eje X en Simulink.	73
Figura 3. 62: Constantes de PID eje de las X.	74
Figura 3. 63: Respuesta al escalando en lazo cerrado para el eje X.....	74
Figura 3. 64: Bloques para el eje de X, con el algoritmo de control PID.	75
Figura 3. 65: Parámetros de control PID en tiempo Real para el eje de las X.	76
Figura 3. 66: Diseño del Algoritmo PID en el eje X.	77
Figura 3. 67: Respuesta a una señal escalón para el eje Y.	78
Figura 3. 68: Planta del Eje X en Simulink.	79
Figura 3. 69: Constantes de PID eje de las Y.	79
Figura 3. 70: Respuesta al escalón en circuito de lazo cerrado para el eje X.....	80
Figura 3. 71 Algoritmo de control PID para el eje Y.....	81
Figura 3. 72: Parámetros de control PID en tiempo Real para el eje Y.	82
Figura 3. 73: Diseño del Algoritmo PID en el eje Y.	83

Figura 3. 74: Algoritmo de control PID.	84
Figura 3. 75: Señal de Control del PID la Plataforma Inercial de 2-GDL.	85
Figura 3. 76: Toolbox Fuzzy de Matlab.	85
Figura 3. 77: Métodos de creación de algoritmo FUZZY.	86
Figura 3. 78: FUZZY y variables para el eje Y y X.	87
Figura 3. 79: Rango de operación de la señal de ERROR del eje X.	87
Figura 3. 80: Rango de operación de la señal de D-ERROR del eje X.....	88
Figura 3. 81: Rango de operación de la señal de CONTROL del eje X.....	88
Figura 3. 82: Reglas de correspondencia de control FUZZY del eje X.	89
Figura 3. 83: Parámetros del Bloque FUZZY en Simulink.	90
Figura 3. 84: Diagrama de control lógico FUZZY para el eje de las X.	91
Figura 3. 85: Rango de operación de la señal de ERROR del eje Y.	92
Figura 3. 86: Rango de operación de la señal de D-ERROR del eje Y.....	92
Figura 3. 87: Rango de operación de la señal de CONTROL del eje Y.....	93
Figura 3. 88: Reglas de correspondencia de control FUZZY del eje Y.....	93
Figura 3. 89: Parámetros del Bloque FUZZY en Simulink.	94
Figura 3. 90: Diagrama de control lógico FUZZY para el eje de las Y.	95
Figura 3. 91: Algoritmo de control FUZZY.....	96
Figura 3. 92: Gráficas del Funcionamiento de control FUZZY.....	97
Figura 3. 93: Movimiento de la esfera sobre pantalla táctil.....	97
Figura 4. 1: Menú de complementos para Matlab.	99
Figura 4. 2: Paquete de Simulink para Hardware Arduino.....	99
Figura 4. 3: Credenciales para cuenta de MathWorks.	99
Figura 4. 4: Paquete de Simulink para hardware Arduino.	100
Figura 4. 5: Componentes para instalación completa de Arduino IDE.....	100
Figura 4. 6: Instalación de para comunicar las placas Arduino.....	100
Figura 4. 7: Conector IEC y luz piloto indicadora de conexión.	101
Figura 4. 8: Activación de botón marcha y luz piloto ON/OFF.	101
Figura 4. 9: Conexión de cable USB en la planta y el computador.....	101
Figura 4. 10: Reconocimiento conexión de una placa Arduino.....	102
Figura 4. 11: Modelo en blanco de Simulink.	102
Figura 4. 12: Bloque “Analog Input” del paquete de soporte para Arduino.	102
Figura 4. 13: Lectura de coordenadas con bloques de entradas analógicas.....	103
Figura 4. 14: Parámetros de configuración Arduino DUE.....	103
Figura 4. 15: Selección del modo de simulación.	103
Figura 4. 16: Botón de ejecución en Simulink.	104
Figura 4. 17: Práctica #1 ejecutada en tiempo real.	104

Figura 4. 18: Lectura de posición superior derecha en la pantalla.	105
Figura 4. 19: Lectura de posición inferior derecha en la pantalla.	105
Figura 4. 20: Lectura de posición inferior izquierda en la pantalla.	105
Figura 4. 21: Lectura de posición superior izquierda en la pantalla.	106
Figura 4. 22: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	108
Figura 4. 23: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	108
Figura 4. 24: Modelo para escritura de ángulos al motor-X.	108
Figura 4. 25: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	108
Figura 4. 26: Parámetros del Bloque “Constant”.	109
Figura 4. 27: Ángulos para motor-X con límites de saturación.	109
Figura 4. 28: Parámetros del Bloque “Sine Wave”.	110
Figura 4. 29: Práctica #2 ejecutada en tiempo real.	110
Figura 4. 30: Valor de 150° enviado al servomotor.	110
Figura 4. 31: Posición del plato a 150° en el eje-X.	111
Figura 4. 32: Valor de 90° enviado al servomotor.	111
Figura 4. 33: Posición del plato a 90° en el eje-X.	111
Figura 4. 34: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	113
Figura 4. 35: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	113
Figura 4. 36: Modelo para escritura de ángulos al motor-Y.	113
Figura 4. 37: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	113
Figura 4. 38: Parámetros del Bloque “Constant”.	114
Figura 4. 39: Ángulos para el motor-Y con límites de saturación.	114
Figura 4. 40: Parámetros del Bloque “Sine Wave”.	114
Figura 4. 41: Práctica #3 ejecutada en tiempo real.	115
Figura 4. 42: Valor de 80° enviado al servomotor.	115
Figura 4. 43: Posición del plato a 80° en el eje-Y.	115
Figura 4. 44: Valor de 20° enviado al servomotor.	116
Figura 4. 45: Posición del plato a 20° en el eje-Y.	116
Figura 4. 46: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	118
Figura 4. 47: Bloque “Data conver X” con la variable “doublé”.	118
Figura 4. 48: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	119
Figura 4. 49: Parámetros del Bloque “Constant”.	119
Figura 4. 50: Bloque de saturación para el servomotor X.	119
Figura 4. 51: Bloque “Kalman Filter” en la librería de Simulink.	120
Figura 4. 52: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.	120
Figura 4. 53: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.	121
Figura 4. 54: Bloque “Discrete PID Controller”.	121

Figura 4. 55: Bloque “Constant” para la referencia del controlador PID.	122
Figura 4. 56: Algoritmo de control PID para el eje X.	122
Figura 4. 57: Parametrización del bloque PID para el eje X.	123
Figura 4. 58: Bloque “Scope” para el eje X.	123
Figura 4. 59: Algoritmo de control PID para el eje X con el bloque “SCOPE”.	124
Figura 4. 60: Variable Ts en la ventada de comando de Matlab.	124
Figura 4. 61: Algoritmo de control PID para el eje X en tiempo real.	124
Figura 4. 62: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje X.	125
Figura 4. 63: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje X.	125
Figura 4. 64: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	128
Figura 4. 65: Bloque “Data conver Y” con la variable “doublé”.	128
Figura 4. 66: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	129
Figura 4. 67: Parámetros del Bloque “Constant”.	129
Figura 4. 68: Bloque de saturación para el servomotor Y.	129
Figura 4. 69: Bloque “Kalman Filter” en la librería de Simulink.	130
Figura 4. 70: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.	130
Figura 4. 71: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.	131
Figura 4. 72: Bloque “Discrete PID Controller”.	131
Figura 4. 73: Bloque “Constan” para la referencia del controlador PID.	132
Figura 4. 74: Algoritmo de control PID para el eje Y.	132
Figura 4. 75: Parametrización del bloque PID para el eje Y.	133
Figura 4. 76: Bloque “Scope” para el eje Y.	133
Figura 4. 77: Algoritmo de control PID para el eje Y con el bloque “SCOPE”.	134
Figura 4. 78: Variable Ts en la ventada de comando de Matlab.	134
Figura 4. 79: Algoritmo de control PID para el eje Y en tiempo real.	134
Figura 4. 80: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje delas Y.	135
Figura 4. 81: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje Y.	135
Figura 4. 82: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	138
Figura 4. 83: Bloque “Data conver” con la variable “doublé”.	139
Figura 4. 84: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	139
Figura 4. 85: Parámetros del Bloque “Constant”.	139
Figura 4. 86: Bloque de saturación para los servomotores X y Y.	140
Figura 4. 87: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.	140
Figura 4. 88: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.	141
Figura 4. 89: Filtrado de las señales de la pantalla táctil resistiva.	141
Figura 4. 90: Bloque “Discrete PID Controller”.	141
Figura 4. 91: Bloque “Constant” para la referencia del controlador PID.	142

Figura 4. 92: Algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.	142
Figura 4. 93: Parametrización del bloque PID para el eje X y Y.	143
Figura 4. 94: Bloque “Sine Wave” para la creación de la señal circular.	143
Figura 4. 95: Parametrización de los bloques “Sine Wave”	144
Figura 4. 96: Algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.	144
Figura 4. 97: Bloques “Scope” para el eje X y Y.	145
Figura 4. 99: Variable Ts en la ventana de comando de Matlab.	145
Figura 4. 100: Algoritmo de control PID para el eje de las X y Y en tiempo real. ...	145
Figura 4. 101: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje de las X y Y. .	146
Figura 4. 102: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.	146
Figura 4. 103: Algoritmo de control PID para el seguimiento de trayectoria.	147
Figura 4. 104: Grafica del seguimiento de la esfera.	147
Figura 4. 105: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.	148
Figura 4. 106: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.	150
Figura 4. 107: Bloque “Data conver X” con la variable “doublé”.	150
Figura 4. 108: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.	151
Figura 4. 109: Parámetros del Bloque “Constant”.	151
Figura 4. 110: Bloque de saturación para el servomotor X.	151
Figura 4. 111: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.	152
Figura 4. 112: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.	152
Figura 4. 113: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.	153
Figura 4. 114: Bloque “FUZZY Logic Controller”.	153
Figura 4. 115: Bloque “Constan” para la referencia del controlador FUZZY.	154
Figura 4. 116: Algoritmo de control PID para el eje X.	154
Figura 4. 117: Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.	155
Figura 4. 118: Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.	155
Figura 4. 119: FUZZY para el eje X.	156
Figura 4. 120: Funciones de membresía para las variables de entrada.	156
Figura 4. 121: Funciones de membresía para las variables de entrada.	157
Figura 4. 122: Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY del eje X. .	157
Figura 4. 123: Parametrizar el Bloque FUZZY en Simulink.	158
Figura 4. 124: Controlador FUZZY para el eje X.	158
Figura 4. 125: Bloque “Scope” para el eje X.	159
Figura 4. 126: Algoritmo de control FUZZY para el eje X.	159
Figura 4. 127: Variable Ts en la ventana de comando de Matlab.	159
Figura 4. 128: Algoritmo de control FUZZY para el eje X en tiempo real.	160
Figura 4. 129: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje X.	160

Figura 4. 130: Bloque "SCOPE" utilizado en sistema SISO para el eje X.....	161
Figura 4. 131: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.....	163
Figura 4. 132: Bloque "Data conver Y" con la variable "doublé".	163
Figura 4. 133: Bloque "Constant" en la librería de Simulink.	164
Figura 4. 134: Parámetros del Bloque "Constant".	164
Figura 4. 135: Bloque de saturación para el servomotor Y.....	164
Figura 4. 136: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.	165
Figura 4. 137: Parametrización para el bloque "Kalman Filter".....	165
Figura 4. 138: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.....	166
Figura 4. 139: Bloque "FUZZY Logic Controller".	166
Figura 4. 140: Bloque "Constan" para la referencia del controlador FUZZY.....	167
Figura 4. 141: Algoritmo de control PID para el eje Y.	167
Figura 4. 142: Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.....	168
Figura 4. 143: Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.....	168
Figura 4. 144: FUZZY para el eje Y.	169
Figura 4. 145: Funciones de membresía para las variables de entrada.	169
Figura 4. 146: Funciones de membresía para las variables de entrada.	170
Figura 4. 147: Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY del eje Y.	170
Figura 4. 148: Parametrizar el Bloque FUZZY en Simulink.	171
Figura 4. 149: Controlador FUZZY para el eje Y.....	171
Figura 4. 150: Bloque "Scope" para el eje Y.	172
Figura 4. 151: Algoritmo de control FUZZY para el eje Y	172
Figura 4. 152: Variable Ts en la ventada de comando de Matlab.....	172
Figura 4. 153: Algoritmo de control FUZZY para el eje Y en tiempo real.....	173
Figura 4. 154: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje Y.....	173
Figura 4. 155: Bloque "SCOPE" utilizado en sistema SISO para el eje Y.....	174
Figura 4. 156: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.....	176
Figura 4. 157: Bloque "Data conver" con la variable "doublé.....	177
Figura 4. 158: Bloque "Constant" en la librería de Simulink.	177
Figura 4. 159: Parámetros del Bloque "Constant".	177
Figura 4. 160: Bloque de saturación para los servomotores X y Y.	178
Figura 4. 161: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.	178
Figura 4. 162: Parametrización para el bloque "Kalman Filter".....	179
Figura 4. 163: Filtrado de las señales de la pantalla táctil resistiva.	179
Figura 4. 164: Bloque "FUZZY Logic Controller".	180
Figura 4. 165: Bloque "Constant" para la referencia del controlador PID.	180
Figura 4. 166: Algoritmo de control FUZZY.....	181

Figura 4. 167:	Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.....	181
Figura 4. 168:	Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.....	182
Figura 4. 169:	FUZZY para el eje X y Y.	182
Figura 4. 170:	Funciones de membresía para FuzzyX.....	183
Figura 4. 171:	Funciones de membresía para FuzzyY.....	183
Figura 4. 172:	Funciones de membresía para las variables de entrada.	184
Figura 4. 173:	Funciones de membresía para FuzzyY.....	184
Figura 4. 174:	Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY.....	185
Figura 4. 175:	Parametrizar los Bloque FUZZY en Simulink.	185
Figura 4. 176:	Bloque FUZZY en Simulink.	186
Figura 4. 177:	Bloque “Sine Wave” para la creación de la señal circular.....	186
Figura 4. 178:	Parametrización de los bloques “Sine Wave”.....	187
Figura 4. 179:	Algoritmo de control FUZZY con el seguimiento de trayectoria	187
Figura 4. 180:	Bloques “Scope” para el eje X y Y.....	188
Figura 4. 181:	Algoritmo de control FUZZY para el eje X y Y.....	188
Figura 4. 182:	Variable Ts en la ventana de comando de Matlab.....	188
Figura 4. 183:	Algoritmo de control FUZZY para el eje de las X y Y.....	189
Figura 4. 184:	Posición del objeto en la referencia 550 para el eje de las X y Y. .	189
Figura 4. 185:	Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.....	190
Figura 4. 186:	Algoritmo de control FUZZY para el seguimiento de trayectoria....	190
Figura 4. 187:	Grafica del seguimiento de la elíptica.....	190
Figura 4. 188:	Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.....	191
Figura 5. 1:	Plataforma Inercial de 2-GDL.....	192
Figura 5. 2:	Tarjeta PCB instalada.	192
Figura 5. 3:	Panel de control.	193
Figura 5. 4:	Análisis de la respuesta en tiempo real del PID en el eje X.....	194
Figura 5. 5:	Análisis de la respuesta en tiempo real del PID en el eje Y.....	194
Figura 5. 6:	Algoritmo de control PID en tiempo real.	195
Figura 5. 7:	Análisis de la respuesta en tiempo real del FUZZY en el eje X.	195
Figura 5. 8:	Análisis de la respuesta en tiempo real del FUZZY en el eje Y.	196
Figura 5. 9:	Algoritmo de control FUZZY en tiempo real.	196
Figura 5. 10:	Seguimiento de trayectoria con el controlador PID.....	197
Figura 5. 11:	Seguimiento de trayectoria con el controlador FUZZY.	197
Figura 6. 1:	III jornada científica de electrónica y automatización 2019.....	199
Figura 6. 2:	Análisis de resultados.....	199
Figura 6. 3:	Formato de encuesta.	200

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS DE DATOS GENERADOS DE LA SEÑAL PRBS.....	207
ANEXO 2: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	212
ANEXO 3: PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	213
ANEXO 4: FACTURAS DE EQUIPOS Y ELEMENTOS VARIOS.....	213
ANEXO 5: DATASHEET PANTALLA TACTIL RESISTIVA	215

INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen varias aplicaciones industriales que tienen el movimiento como principal condición de su entorno, estas pueden operar sobre, vehículos aéreos tripulados y no tripulados, vehículos terrestres, armamento militar inteligente, robots humanoides e inclusive transbordadores si se quiere hablar de naves espaciales, dichas aplicaciones trabajan con los llamados sistemas inerciales montados como dispositivos o módulos de control. Estos dispositivos también conocidos como plataformas inerciales son colocados en el sistema electrónico que en esencia miden la posición espacial y velocidad a la que se desplaza el cuerpo.

En el presente documento se realiza la repotenciación de la plataforma inercial que se encuentra ubicada en el laboratorio de control automático del bloque 'E' de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario, la cual cuenta con dos grados de libertad.

En búsqueda de tener un módulo didáctico con elementos de bajo costo, a la plataforma inercial de 2-GDL se le realiza una repotenciación general que implica el rediseño de su estructura mecánica utilizando acero inoxidable y cambio de sus dispositivos de control utilizando nuevas tarjetas electrónicas. Esta repotenciación se inicia con el diagnóstico de sus partes mecánicas y electrónicas, ya que la plataforma cuenta con elementos que necesitan mantenimiento preventivo o correctivo.

Mediante el diagnóstico de los elementos de la plataforma inercial de 2-GDL, se tiene una idea contundente sobre qué elementos electrónicos se deben reemplazar, sea que se encuentren defectuosos o discontinuados. Y que elementos mecánicos se deben rediseñar para afinar el movimiento de los ejes en la plataforma.

Tomando en cuenta que los estudiantes deben reforzar sus conocimientos prácticos del control automático se debe tener una guía práctica fundamentada con los controladores PID y Fuzzy. Además de reforzar los conocimientos prácticos, esta guía es la evaluación final para la plataforma inercial de 2-GDL.

1. EL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Con el ánimo de realizar un aporte a la carrera de ingeniería electrónica, se determina la necesidad de brindar a los estudiantes la posibilidad de desarrollar en forma práctica lo aprendido en las materias relacionadas a la teoría de control, por esto se plantea repotenciar el laboratorio de control automático del bloque 'E' de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario, con la mejora de la plataforma inercial de dos grados de libertad, que se encuentra en dicho lugar.

1.2 Antecedentes

Debido a que existen muchos principios de medición inercial y avances en la electrónica, se tiene la necesidad del estudio práctico en un sistema inercial, para ello, los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario, tienen a disposición la plataforma inercial de dos grados de libertad, en el laboratorio de control automático del bloque 'E'.

En vista que esta plataforma representa un gran aporte para los estudiantes, se propone este proyecto para repotenciar dicho equipo en sus partes mecánicas y electrónicas mejorando la cinética y comunicación con el software Matlab. Además, no se cuenta con una guía de prácticas, la cual es de vital importancia para evaluar dicha repotenciación.

1.3 Importancia y alcance

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, incluso se ha convertido en una parte importante y casi obligatorio en los sistemas electrónicos de vehículos, terrestres, aéreos, espaciales, robots inteligentes, procesos modernos de fábricas (transporte, llenado y empaquetado del producto), en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. Por esto es fundamental que la mayoría de los ingenieros y científicos estén familiarizados con la teoría y la práctica del control automático. (Ogata, 2010)

En el laboratorio de control automático existen los equipos necesarios para reforzar el conocimiento adquirido en las materias de teoría de control. Uno de ellos es la plataforma inercial de 2-GDL, que con su repotenciación y desarrollo de una guía práctica fundamentada con el diseño y evaluación de controladores PID y Fuzzy, son la ayuda que los futuros ingenieros electrónicos necesitan para elegir el mejor control al momento de encontrarse frente a situaciones reales dentro de su respectivo campo laboral.

1.4 Delimitación

1.4.1 Temporal

El trabajo de titulación es realizado entre los años 2017 al 2019.

1.4.2 Espacial

El trabajo de titulación está destinado para su uso en el laboratorio de control automático que está ubicado en el tercer piso del bloque 'E' de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario con dirección Chambers #277 entre Laura Vicuña y Robles.

1.4.3 Académico

La repotenciación de este proyecto se enfoca en el desarrollo práctico de lo aprendido en las materias relacionadas con la teoría de control. La plataforma inercial de 2-GDL está delimitada académicamente para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica. Se realiza una guía que consta de 9 prácticas didácticas para evaluar el funcionamiento de la plataforma inercial de 2-GDL. Además, los futuros estudiantes egresados pueden realizar estudios de investigación para utilizar otros controladores con el fin de evaluar su rendimiento y facilidad de aplicación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Repotenciar la plataforma inercial de 2-GDL para su óptimo desempeño y realizar una guía de prácticas para las materias de Teoría de Control I, II y III utilizando los controladores PID y FUZZY.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado de las partes mecánicas y electrónicas de la plataforma inercial para su correcto funcionamiento.
- Reemplazar los elementos defectuosos o discontinuados que se encuentren en la plataforma de acuerdo al diagnóstico inicial.
- Definir el modelo del sistema, empleando herramientas de identificación con la ayuda del Software Matlab (Ident).
- Implementar una guía de prácticas utilizando los controladores PID y FUZZY aplicados en la plataforma inercial.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas inerciales

El grupo de cuerpos respecto de otro sistema los cuales se puede describir el movimiento, se llama “*sistema de referencia*”, y los sistemas con el objetivo de que la ley de inercia se verifique en ellos se llaman “*sistemas inerciales*”. Es sencillo ver que cualquier sistema que se mueva constantemente en relación con otro grupo de cuerpos es también llamado sistema inercial. Al considerar el libre movimiento de un cuerpo no se diferencia entre varios sistemas inerciales. La experiencia demuestra que todas las leyes de la mecánica son equivalentes en cada sistema inercial, y esto se conoce como *el principio de la relatividad de Galileo*. (Roederer, 2002)

2.2 Plataforma Inercial

La estabilización de las plataformas inerciales ha tenido mucho interés durante bastante tiempo en aplicaciones aeronáuticas y en navegación marítimas. Regularmente, este tipo de plataformas están situadas en un eje que tiene una específica orientación variable con respecto a la tierra. Estas variaciones de orientación del eje son detectadas por sensores giroscópicos situados hacia un extremo de la plataforma. Entre algunos modelos de ejemplo se tiene, el control automático de aeronaves, el dispositivo que controla la dirección de un torpedo, el equilibrio de la mira para rastreo visual, sistemas con movimiento planetario traslacional, el control de robots humanoides y entre otros diversos dispositivos. En cada uno de estos casos, el ajuste inercial requiere una realimentación de un sensor giroscópico situado en la plataforma móvil, que por regla general proporciona la velocidad de un cuerpo con respecto al marco inercial. (Rubio, Ortega, & Gordillo, 2010)

2.2.1 Grados de Libertad

El concepto de grados de libertad o GDL (degrees of freedom o DOF en inglés) es pobremente explicado en textos de investigación, esto puede advertir que se trata de un tema difícil de comprender y de esta manera ser pasado por alto la posterior revisión del estudiante. El significado de grados de libertad se puede comprender

desde un punto de vista geométrico, algebraico e inclusive intuitivo. La geometría nos detalla a los grados de libertad como espacios e hiperespacios de libertad a través de los cuales una medida de resumen puede moverse y tomar diferentes valores. El punto de vista algebraico los describe como el número de ecuaciones que se crean usando los datos. Ambos puntos de vista se relacionan y ayudan a entender con mayor fondo el concepto de grados de libertad.

El número de grados de libertad se comprende mejor si es visto como el número de dimensiones espaciales en los que un punto es libre de moverse. Cada relación que se establece hace que se tengan que modificar los grados de libertad si va a ser usado en cálculos futuros. (Cruz-Oré & Luis, 2013)

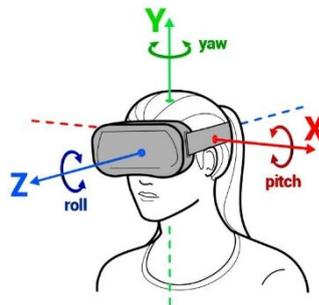


Figura 2. 1: Grados de libertad en la visión de una persona. (Idis, 1996)

2.3 Servomotores

El servomotor es un dispositivo electromecánico que básicamente contiene un motor eléctrico, un juego de engranes, potenciómetro y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa plástica o de metal. Un servo tiene la cualidad de ser controlado en posición y capaz de ubicarse en cualquier ángulo dentro de un rango de operación generalmente de 180° pero puede ser fácilmente modificado para tener un giro libre de 360° . Estos suelen ser utilizados en robótica, automatismo y modelismo (vehículos por radio-control) debido a su gran precisión en el posicionamiento. (Mecafenix, 2017)



Figura 2. 2: Servomotor DC y Servomotor AC. (Direct Industry, 2019)

Los servomotores funcionan por medio de modulación de ancho de pulso (PWM). Todos los servos disponen de tres cables, dos para alimentación Vcc y Gnd (4.8 hasta 7.4 [V]) y un tercero para aplicar el tren de pulsos de control, que hace que el circuito de control diferencial interno ponga el servo en la posición indicada. La frecuencia usada para mandar la secuencia de pulsos al servomotor es de 50 Hz esto significa que cada ciclo dura 20 ms, las duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que los espacios entre cada pulso son despreciados. (Mecafenix, 2017)

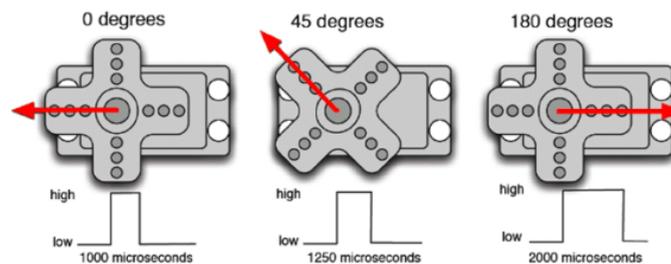


Figura 2. 3: Variación de ángulos en el servomotor de acuerdo a su señal PWM.
(Mecafenix, 2017)

2.3.1 Partes de un servomotor

En general, los servos suelen estar compuestos por 4 elementos fundamentales:

- **Motor de corriente continua (DC)**

Es el componente que le entrega movilidad al servo. Cuando se aplica una diferencia de potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el potencial aplicado sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.

- **Engranajes reductores**

El conjunto de engranajes se encarga de reducir la alta velocidad de giro del motor para acrecentar su capacidad de torque o par-motor.

- **Sensor de desplazamiento**

Normalmente es un potenciómetro ubicado en el eje de salida que se utiliza para conocer la posición angular del servomotor.

- **Circuito de control**

Es la placa electrónica que efectúa una táctica de control para la posición por realimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada) con la posición actual medida por el potenciómetro. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la dirección necesaria para reducir el error. (Mecafenix, 2017)

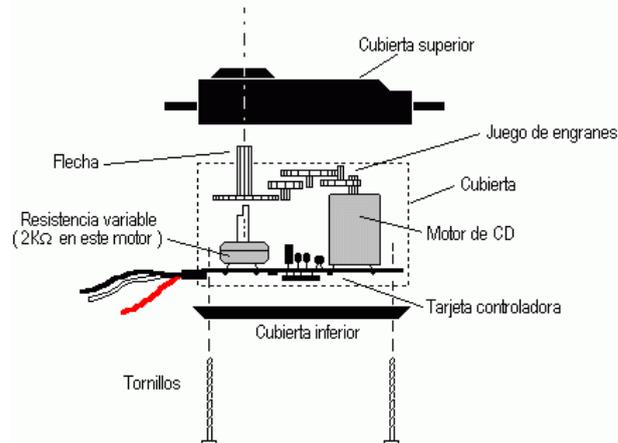


Figura 2. 4: Partes de un servomotor DC. (Mecafenix, 2017)

El servomotor tiene 3 cables, Vcc, Gnd y la señal. Los colores son los siguientes:

- Rojo – Vcc (4.8 hasta 7.4 [V])
- Marrón – Gnd
- Naranja – Señal de control (PWM)



Figura 2. 5: Conector del servomotor con sus 3 cables, Vcc, GND y Señal.

2.4 Panel Táctil Resistivo

Las pantallas táctiles dan una posición precisa del punto que se presiona sobre ellas. Según el proceso utilizado en su montaje, hay varios tipos. A pesar de existir las pantallas táctiles por IR, también se tiene hoy en día las capacitivas, de onda acústica superficial (SAW) y resistivas. Las más utilizadas y que se presenta en este proyecto

de titulación son los de tipo resistivo. Su destacado funcionamiento junto con un costo muy competitivo y un manejo simple las convierte en piezas significativamente importantes y de fácil acceso para todo tipo de trabajo que conlleve la necesidad de obtener una posición. (Echeverría, Angulo, & Angulo, 2008)

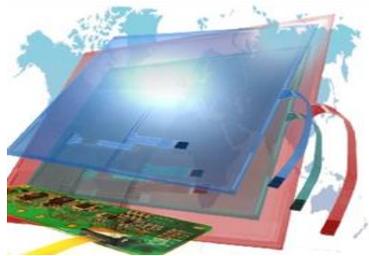


Figura 2. 6: Pantalla táctil de vidrio o touch panel, compuesta de varias capas.
(Alcívar Cevallos & Parrales Duarte, 2015)

2.4.1 Panel táctil resistivo de 4 cables

Las pantallas táctiles resistivas se forman de dos capas de un material conductor (óxido de indio y estaño) que tienen una resistencia contra el flujo eléctrico que es proporcional a la longitud de este material conductor. Una de las capas se usa para obtener la posición del punto en el eje X y la otra en el eje Y. Como se muestra en la siguiente figura, una de las capas tiene dos barras del material conductor en los lados paralelos asociadas con los pines X+ y X-, mientras que la otra capa tiene otras dos barras en la parte superior e inferior de la pantalla, que están asociadas con los pines Y + e Y - . (Echeverría et al., 2008)

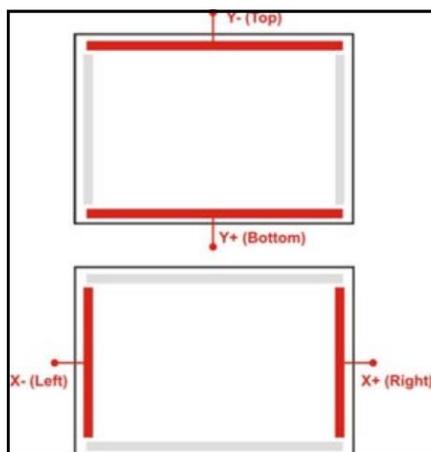


Figura 2. 7: Distribución de pines de conexión para el panel táctil resistivo.
(Echeverría et al., 2008)

A medida que el toque o el "contacto" en la pantalla se hace hacia un lado o el otro en sentido horizontal, el voltaje incrementa o disminuye en X+. El voltaje en Y+ de igual forma incrementa o disminuye a medida que el "contacto" se hace más abajo o arriba en el sentido vertical. Dicho esto, cuando se conecta una diferencia de potencial entre Y+ e Y-, el pin X+ da un voltaje correspondiente a la posición del "contacto" en sentido horizontal. Lo equivalente ocurre con el pin Y+, en sentido vertical, cuando hay una diferencia de potencial conectado entre X+ y X-. (Echeverría et al., 2008)

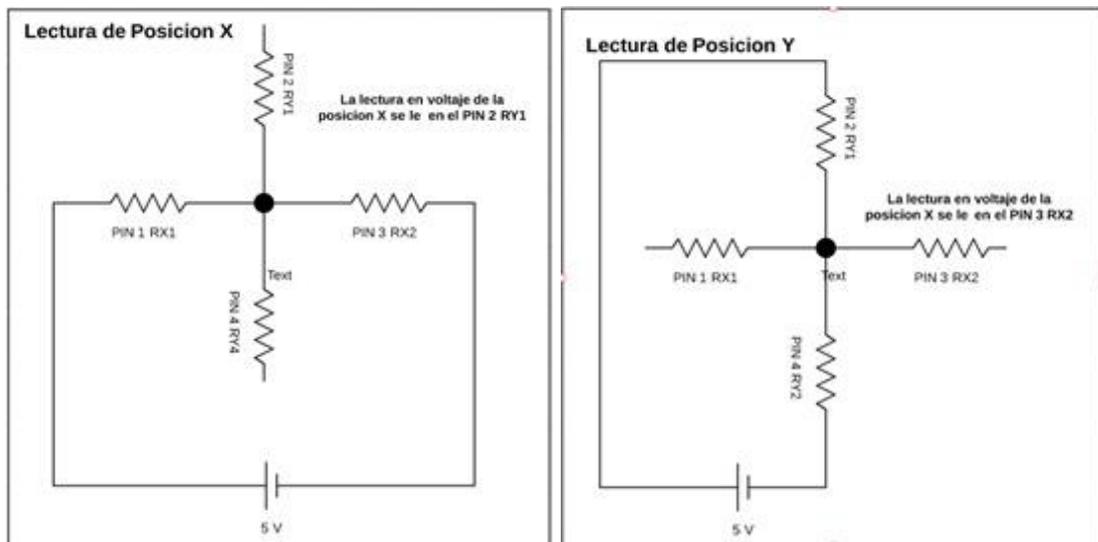


Figura 2. 8: Arreglo de resistencias en el panel táctil resistivo.

2.5 Tarjeta de circuito impreso o PCB

Una tarjeta de circuito impreso o PCB en inglés (Printed Circuit Board), también llamada baquelita o baquela, es una placa o lámina que se usa para conectar los distintos elementos que conforman el circuito y es el núcleo de la mayoría de dispositivos en la tecnología como un teléfono móvil, una CPU, un robot, el sistema electrónico de un vehículo.

Los circuitos impresos son muy utilizados en el diseño electrónico, mecatrónica, eléctrica, producción y manufactura de investigaciones innovadoras. Hoy en día todos los productos electrónicos tienen dentro de sí, este tipo de tarjetas con diferentes formas, características, tamaño, componentes y colores. (Aparicio, 2010)

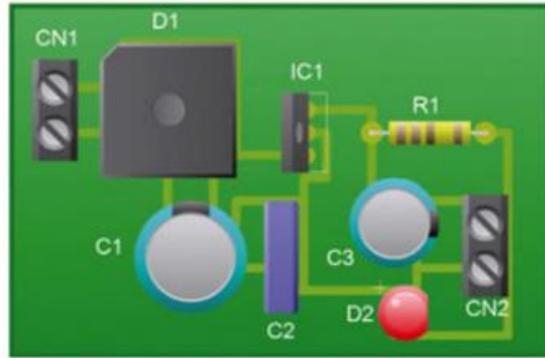


Figura 2. 9: Tarjeta de circuito impreso. (Castillo, 2017)

2.5.1 Relé o Relevador

Es un dispositivo eléctrico que funciona como un interruptor, abriendo y cerrando la entrada del flujo eléctrico, sin embargo, funciona eléctricamente. El relé permite que los contactos se abran o cierren por medio de un electroimán, es la razón por la que también se les llama relevador o relés electromagnéticos. En la figura esclarece su funcionamiento.(Harper, 2005)

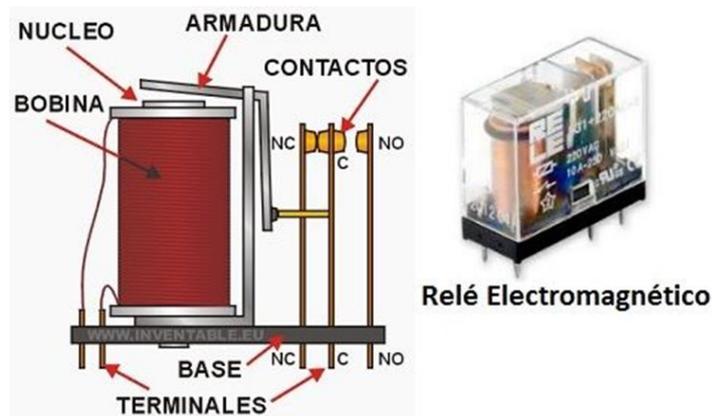


Figura 2. 10: Mecanismo de un relé y relé tipo electromagnético. (Área Tecnología, 2016)

2.5.2 Borneras y Espadines

La Bornera de dos Pines es un componente básico que no debe faltar a la hora de diseñar tus circuitos impresos, este componente permite conectar una alimentación externa con la sujeción rápida que posee en sus entradas delanteras, las cuales están hechas de metal para la conductividad. La bornera es compatible no solo con circuitos impresos sino también con protoboards. (Castillo, 2017)

Una tira de pines o espadines hembra como su nombre lo indica es una tira que posee los pines de acuerdo a la necesidad tal y como se ve en la figura ya sean de tres o cuatro pines, estas tiras son muy útiles cuando se quiere realizar conexiones en placas impresas, la ventaja de estas tiras es que se pueden soldar a una placa y se puede conectar a otro dispositivo con ayuda de jumpers machos. (Castillo, 2017)



Figura 2. 11: Borneras, espadines hembra y espadines macho. (Castillo, 2017)

2.5.3 Filtro RC Pasa bajo

Son aquellos que aplican muy poca atenuación a la frecuencia que es más baja que una específica, llamada la frecuencia de corte. Las frecuencias que sobrepasan la frecuencia de corte se filtran y son atenuadas fuertemente. Dado que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia, el circuito RC mostrado discrimina estas altas frecuencias. (Ibarra & López, 2007)

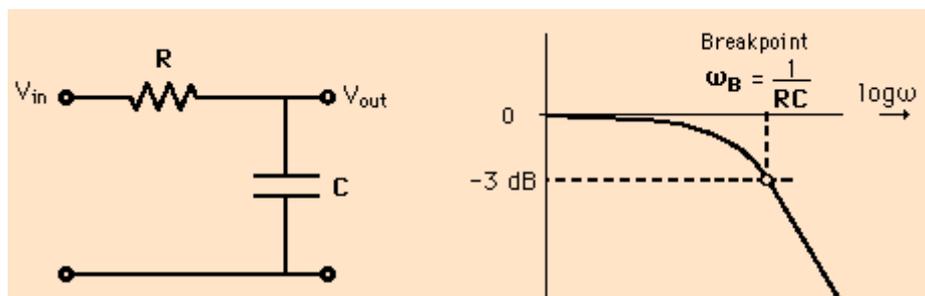


Figura 2. 12: Circuito RC y su gráfica en función de la frecuencia. (Olmo Nave, 2017)

2.6 Modulación por ancho de pulso o PWM

Modulación por ancho de pulso o PWM en inglés (Pulse Width Modulation). Es un tipo de señal de voltaje que se usa en la electrónica con una amplia gama de aplicaciones y para distintas tareas. En el entorno se encuentran varios dispositivos que utilizan PWM para realizar alguna actividad. (Tomasi, 2003)

2.6.1 Cómo funciona la modulación por ancho de pulso

La PWM está formada por una señal de onda cuadrada que generalmente no tiene una relación similar entre el tiempo en que es alta y el tiempo en que es baja. En la figura se ve una señal que cambia entre 5 voltios y 0 voltios. La señal fluctúa cierto tiempo entre estos dos valores de voltaje. Durante un tiempo específico, la señal está en alto (5 voltios) y para otro período de tiempo está en bajo, el segundo valor de voltaje (0 voltios). (Rashid, 2004)

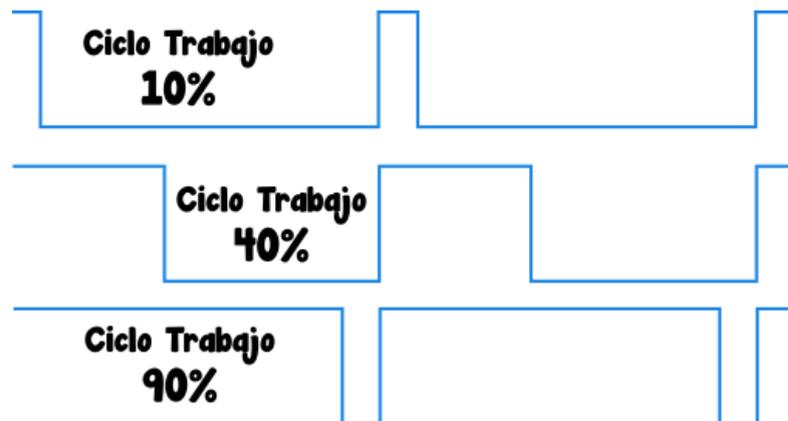


Figura 2. 13: Porcentajes diferentes del ciclo de trabajo en la señal PWM. (Gómez, 2017)

El tiempo que la señal está en alto (5 voltios) se lo denomina (T_{on}), mientras que el tiempo que la señal está en bajo se lo denomina (T_{off}). El tiempo completo sumado de alto y bajo es el periodo de la señal (T). Y como en cualquier señal periódica, el inverso del período ($1 / T$), es la frecuencia de esta. La PWM funciona cambiando su voltaje entre estos dos valores conocidos, por ejemplo, V_{cc} y GND en periodos de tiempo específicos y con una frecuencia fija. (Rashid, 2004)

2.6.2 Ciclo de trabajo o Duty Cycle

La variación la señal PWM comprende diferentes tiempos de encendido y apagado, es decir, Ton y Toff. Al cambiar el valor de un PWM, realmente se están ajustando estos tiempos. Uno de los atributos más significativos de una señal PWM es su ciclo de trabajo o Duty Cycle, en inglés, ya que este es el que fluctúa en un PWM. El ciclo de trabajo no es otra cosa que la relación entre el tiempo que está alto y el periodo o tiempo total de la señal PWM. (Rashid, 2004)

$$(1) \quad DC = \frac{T_{on}}{T}$$

Cuanto mayor sea el Duty Cycle, más extendido será la señal de voltaje alto, sin cambiar el período. Por lo tanto, si el período ni la suma de Ton y Toff cambian, el tiempo de voltaje bajo disminuye cuando el tiempo de voltaje alto aumenta. Esta es la razón por la que se llama modulación por ancho de pulso, dado que realmente es el ancho del pulso el cual se modifica. (Rashid, 2004)

Normalmente, el valor del ciclo de trabajo se expresa en porcentaje y para eso solo se necesita multiplicar por 100 la ecuación (1).

$$(2) \quad DC = \frac{T_{on}}{T} * 100$$

Si el ciclo de trabajo es del 90%, como en la siguiente imagen, la señal se encuentra en un estado alto durante el 90% del período. PWM de 90%.

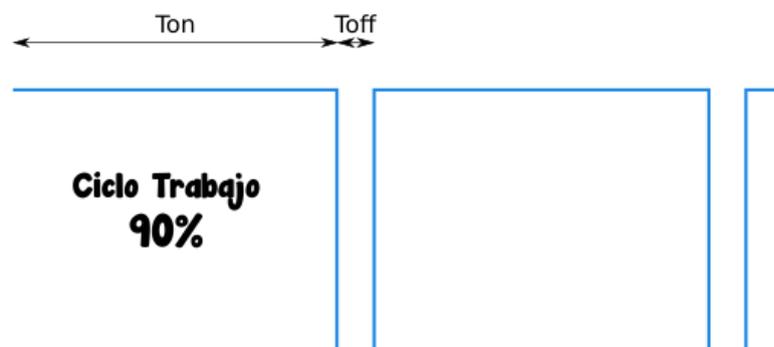


Figura 2. 14: Ciclo de trabajo del 90% en la señal PWM. (Gómez, 2017)

Si el ciclo de trabajo es del 20%, como en la siguiente imagen, la señal será del 20% del tiempo en estado alto y el 80% del tiempo en estado bajo. PWM de 20%.

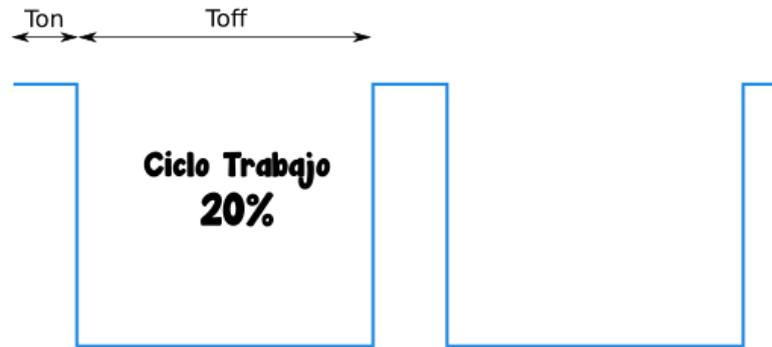


Figura 2. 15: Ciclo de trabajo del 20% en la señal PWM. (Gómez, 2017)

2.6.3 Usos para la señal PWM

Con lo antes mencionado se sabe que la PWM es una señal que fluctúa el ancho de su pulso y se basa en el parámetro que se llama, ciclo de trabajo. Lo que no se ha discutido aún es para lo que nos sirve la modulación por ancho de pulso en la práctica. Lo cierto es que cambiando el ciclo de trabajo de una señal PWM, lo que se hace es cambiar su voltaje promedio y esta es la clave por la cual se utiliza en muchas ocasiones el PWM. Cuando una señal de voltaje promedio atraviesa ciertos elementos electrónicos, puede hacer que cambie su conducta. Por ejemplo, LEDs, motores de corriente continua o ventiladores, incluidos altavoces y timbres. (GOILAV & LOI, 2016)

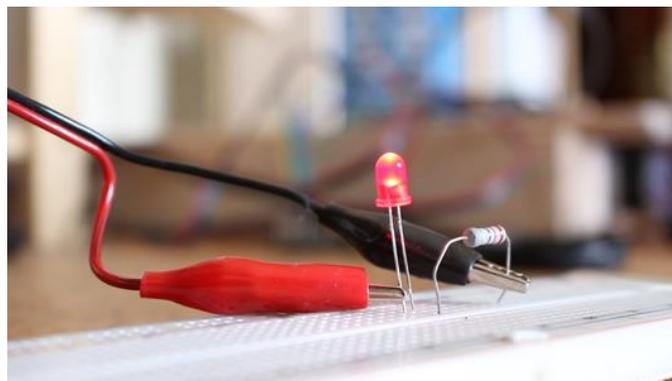


Figura 2. 16: Control de brillo en un diodo LED con la señal PWM. (Gómez, 2017)

En el caso que se tenga un LED conectado con un microcontrolador, se puede cambiar el brillo con el que se enciende el LED variando la señal PWM a la que está sometido. Otra opción puede ser controlar la velocidad de un motor de CC, por ejemplo, aquellas PC que utilizan ventiladores, a pesar del hecho que tiende a ser utilizado con cualquier motor de CC. Cuando el ciclo de trabajo varía, la velocidad

cambia a medida que cambia el voltaje promedio en el bobinado del motor. Con un ciclo de trabajo del 100%, el motor girará a toda velocidad. Al disminuir el ciclo de trabajo, se reducirá la velocidad. Otra gran ventaja es enviar una señal PWM que cambia su ciclo de trabajo a un altavoz o timbre para crear sonidos y canciones de manera efectiva y rápida. (GOILAV & LOI, 2016)

2.7 HARDWARE Y SOFTWARE - ARDUINO

Arduino es una plataforma para desarrollo de código abierto que depende de equipos y programación sencillos de utilizar. Las tarjetas de Arduino pueden leer en sus entradas, luz de un sensor, la pulsación de un botón o hasta un mensaje de Twitter y transformarlo en una señal de salida para: activar un motor, encender un LED, publicar algo en la web. Se puede indicar a la tarjeta lo que haga enviando instrucciones al microcontrolador. Para hacer esto, se usa el lenguaje de programación Arduino (basado en C++) y el software de Arduino, que es un entorno de desarrollo integrado o IDE en inglés (Integrated Development Environment). (Artero, 2013)

2.7.1 ARDUINO NANO

El hardware Arduino Nano utiliza el mismo microcontrolador del Arduino Uno, que es el ATmega328, sin embargo, en su versión SMD que disminuye su tamaño en gran medida. Tiene 14 pines de entrada/salida, 6 de ellos son PWM y tiene 8 entradas analógicas. (Artero, 2013)



Figura 2. 17: Tarjeta Arduino NANO. (El Arduino, 2019)

Características técnicas del Arduino NANO:

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltaje de operación: 5V
- Voltaje de alimentación (Recomendado): 7-12V
- I/O Digitales: 14 (6 son PWM)
- Entradas Analógicas: 8
- Memoria Flash: 32KB
- EEPROM: 1KB
- Velocidad del reloj: 16MHz
- Dimensiones: 0.73" x 1.70"

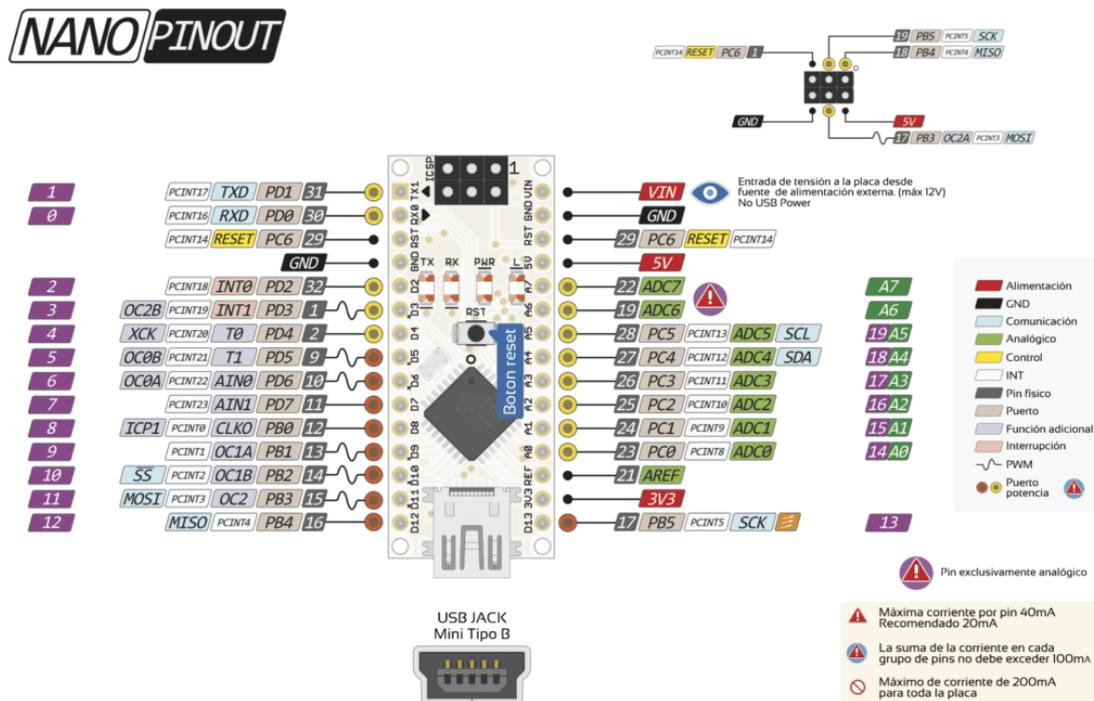


Figura 2. 18: Diagrama pines del Arduino NANO. (El Arduino, 2019)

2.7.2 ARDUINO DUE

El hardware Arduino DUE utiliza el microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Es el primer Arduino basado en un microcontrolador ARM de 32 bits y tiene 54 pines de entrada/salida digital (de todos estos, 12 se pueden utilizar como salidas PWM), 12 entradas análogas, 4 UARTs (hardware), un reloj de 84MHz, USB OTG, 2 DACs, 2 TWI, conector para alimentación de voltaje, cabezal SPI, cabezal JTAG, botón de borrado y botón de reset. (Millahual, 2017)

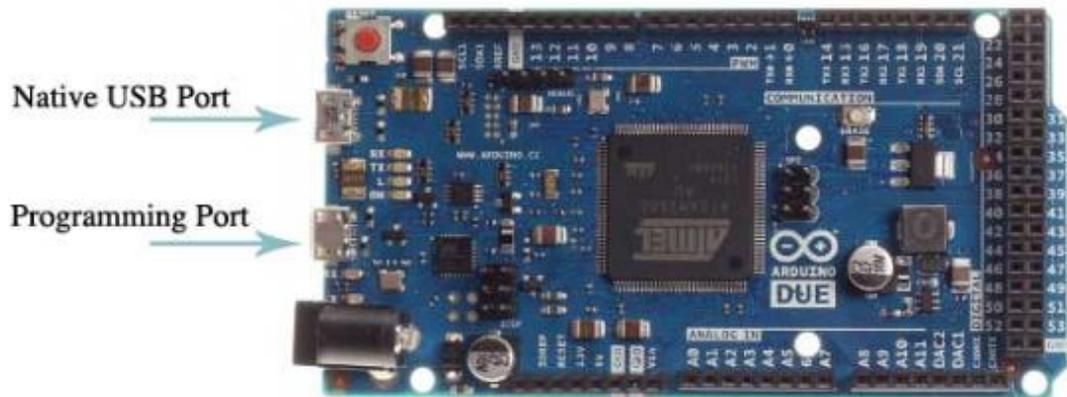


Figura 2. 19: Puertos de programación en Arduino DUE. (Delgado Crespo, 2016)

Advertencia: En contraste con otras placas, la Arduino DUE funciona con 3.3V. El máximo voltaje que los pines de entrada/salida pueden tolerar es 3.3V, proporcionarles un voltaje mayor, como 5V puede dañar la placa. Compatible con las Shields que funcionan con 3.3V. (Millahual, 2017)

La Arduino DUE supera las placas con microcontroladores de 8 bits ya que tiene un núcleo ARM de 32 bits. Las diferencias más marcadas son:

- Permite hacer operaciones en datos de 32 bits en cada ciclo de reloj.
- Reloj para la CPU de 84Mhz
- Memoria SRAM de 96 KB
- Memoria Flash de programa de 512 KB
- Controlador DMA, libera la CPU de acceso a memoria a las multitareas intensivas

Características técnicas del Arduino DUE:

- Microcontrolador: AT91SAM3X8E
- Voltaje de Operación: 3.3V
- Voltaje de Entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de Entrada (límites): 6-20V
- Pines de E/S Digital: 54 (de los cuales 12 proveen salida PWM)
- Pines de Entrada Análoga: 12
- Pines de Salida Análoga: 2 (DAC)
- Corriente DC Total de Salida en todas las líneas de E/S: 130 mA
- Corriente DC para pin 3.3V: 800 mA
- Corriente DC para pin 5V: 800 mA

- Memoria Flash: 512 KB toda disponible para las aplicaciones de usuario
- SRAM: 96 KB (dos bancos: 64KB y 32KB)
- Velocidad de Reloj: 84 MHz
- Dimensiones: 2.10" x 3.99"

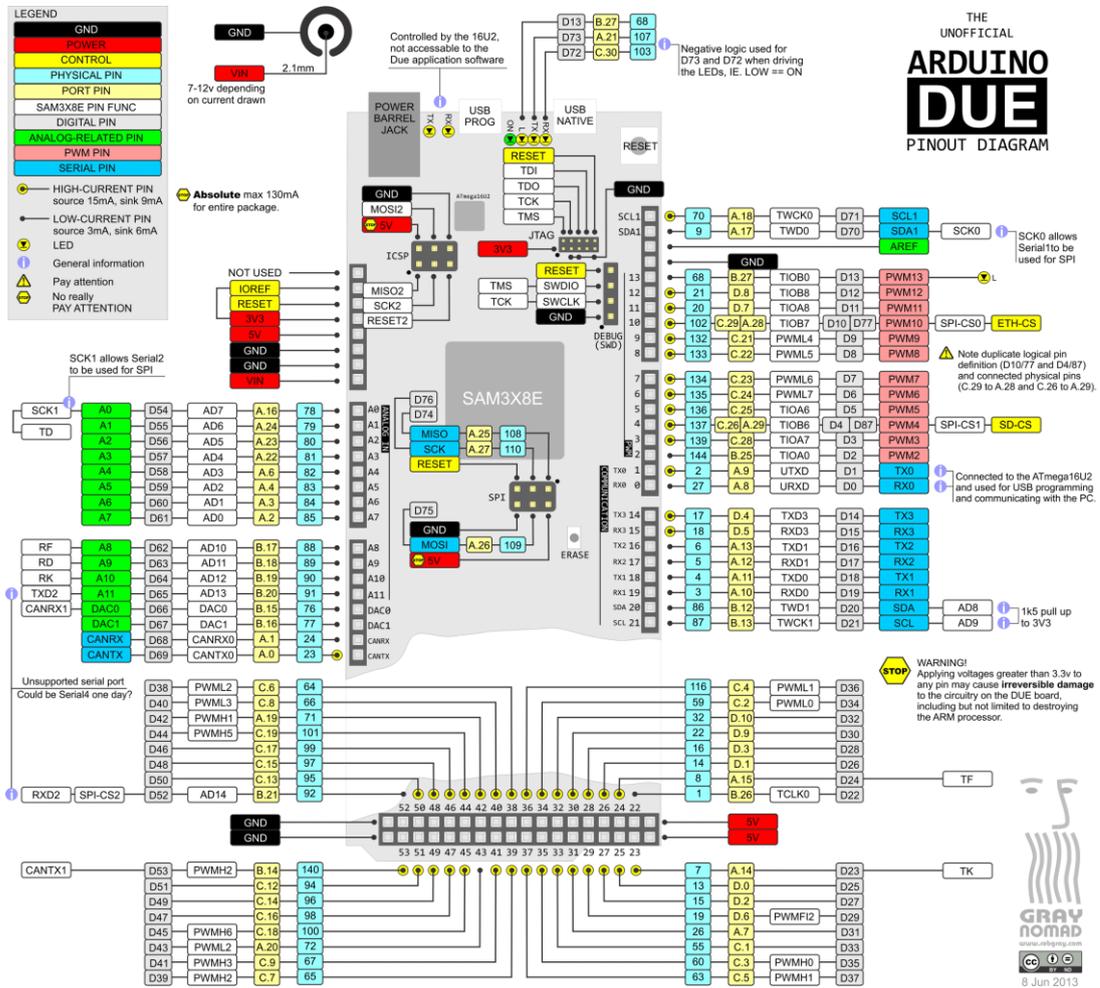


Figura 2. 20: Diagrama pines del Arduino DUE. (Naylamp, 2018)

- Entradas y Salidas

Entradas / Salidas digitales de los pines 0 al 53. Cada uno de los 54 pines digitales en el DUE se puede usar como entrada o salida, usando las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()` y `digitalRead()`. Funcionan a 3,3 voltios. Cada pin puede proporcionar (fuente) una corriente de 3 mA o 15 mA, dependiendo del pin, o recibir (lectura) una corriente de 6 mA o 9 mA, dependiendo del pin. También tienen una resistencia interna de pull-up (desconectada por defecto) de 100 KOhm. Los pines del 2 al 13 proporcionan una salida PWM de 8 bits con la función `analogWrite()`, la resolución del PWM se puede cambiar con la función `analogWriteResolution()`.

Las entradas analógicas de los pines A0 al A11. Cada una puede proporcionar 12 bits de resolución (es decir, 4096 valores diferentes). De forma predeterminada, la resolución de las lecturas se establece en 10 bits. Es posible cambiar la resolución del ADC con `analogReadResolution()`. Los pines de las entradas analógicas de DUE miden desde GND hasta un valor máximo de 3.3V. La aplicación de más de 3.3 V en los pines del DUE dañará el chip SAM3X. Los pines DAC1 y DAC2 proporcionan verdaderas salidas analógicas con una resolución de 12 bits (4096 valores) con la función `analogWrite()`. Tenga en cuenta que el rango de salida DAC es en realidad de 0.55 V a 2.75 V solamente. (Millahual, 2017)

- **Comunicación**

El Arduino DUE tiene una serie de instalaciones para comunicarse con una computadora, otro Arduino u otros microcontroladores y diferentes dispositivos como, cámaras, tabletas, teléfonos, etc.

El puerto de programación está conectado a un ATmega16U2, que proporciona un puerto COM virtual al software en una computadora conectada. En los pines RX0 y TX0 proporciona comunicación serie a USB para programar la placa a través del microcontrolador ATmega16U2. El software Arduino IDE incluye un monitor en serie que permite enviar datos textuales simples desde y hacia la placa. Los LED de RX y TX en la placa parpadearán cuando los datos se transmitan a través del chip ATmega16U2 y la conexión USB a la computadora .

El puerto USB nativo está conectado al SAM3X. Permite la comunicación serial (CDC) a través de USB. Esto proporciona una conexión en serie al Monitor Serial u otras aplicaciones en su computadora. El puerto USB nativo también puede actuar como un host USB para periféricos conectados como ratones, teclados y teléfonos inteligentes. (Millahual, 2017)

- **Protección de Sobrecorrientes USB**

El Arduino DUE tiene un polyfusible reinicializable que protege los puertos USB de su computadora de cortocircuitos y sobrecorriente. Aunque la mayoría de las computadoras brindan su propia protección interna, el fusible proporciona una capa adicional de protección. Si se aplican más de 500 mA al puerto USB, el fusible romperá automáticamente la conexión hasta que se elimine el cortocircuito o la sobrecarga. (Millahual, 2017)

2.7.3 Software de arduino

El entorno de desarrollo integrado Arduino o IDE, es un programa para PC compuesto por herramientas de programación. Muy bien puede estar dedicado solo a un lenguaje de programación o tiende a utilizarse para varios lenguajes. Se ha empaquetado como un programa de aplicación; es decir, se compone de un administrador de código, un compilador, un depurador y un constructor gráfico de interfaz de usuario (GUI). Además, Arduino incorpora las herramientas para cargar el programa compilado en la memoria flash del hardware. (Artero, 2013)

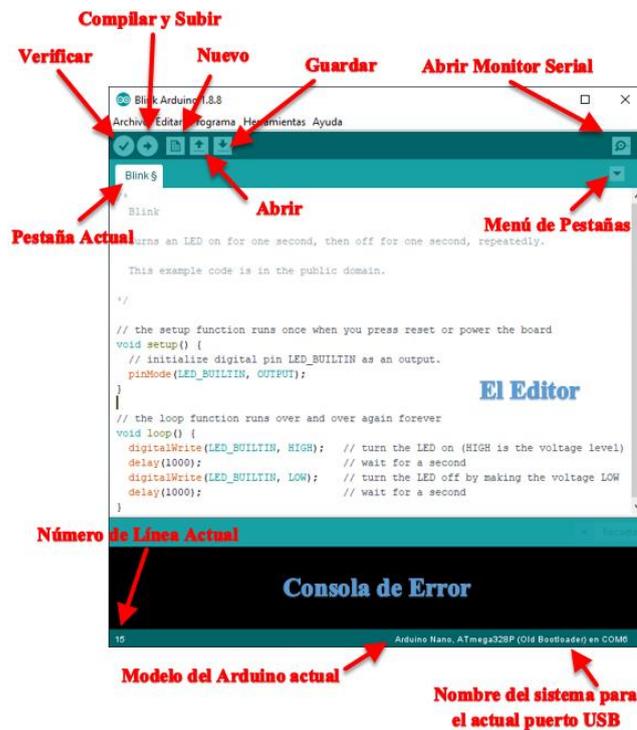


Figura 2. 21: Menús y opciones del software arduino IDE.

Es importante conocer cada uno de los menús y opciones que tiene, pero los más importantes por ahora son:

- Botones de Verificar y Subir
- Botón Monitor Serie
- Consola de Error
- Menú herramientas Placa y Puerto
- Menú de pestañas
- Puerto y placa seleccionada
- Menú preferencias
- Proyecto/Sketch

2.8 Matlab

MATLAB o “laboratorio de matrices” de la abreviatura en inglés (MATrix LABoratory), es un software matemático que sirve como herramienta, ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con su propio lenguaje de programación (lenguaje M). Es accesible para las plataformas Windows, Mac OS, Unix y Linux. El paquete MATLAB tiene dos instrumentos adicionales que amplían sus aspectos más destacados, en particular Simulink (etapa de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, las capacidades de MATLAB se pueden ampliar con herramientas extras o “toolboxes”; y las de Simulink con los paquetes de bloques o “blocksets”. (MathWorks, 2019)

Es un producto generalmente utilizado en universidades y enfocados en trabajos de investigación. En los últimos tiempos, la cantidad de aspectos destacados se ha ampliado, por ejemplo, la programación de procesadores de señales digitales directamente o la creación de código VHDL. (MathWorks, 2019)



Figura 2. 22: Logo de software Matlab/Simulink. (MathWorks, 2019)

Características principales:

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería.
- Entorno de escritorio para exploración iterativa, diseño y solución de problemas.
- Gráficas y herramientas para visualizar datos y crear diagramas personalizados.
- Aplicaciones para clasificar datos, analizar señales y ajustar sistemas de control.
- Toolboxes con amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas
- Interfaces para C/C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft Excel
- Opciones de implementación free para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales.

2.9 Simulink

En la práctica de la ingeniería de control, el modelado es una parte significativa. Hoy en día, con el uso de PC y destacadas programaciones, se pueden simular sistemas genuinos muy impredecibles y su conducta puede anticiparse en el mundo real como también supervisarlos. Utilizando el software MATLAB / SIMULINK, se logra realizar simulación de estimaciones eléctricas de algunos parámetros eléctricos de circuitos eléctricos sencillos o complejos al hacer modelos virtuales en SIMULINK. Además de SIMULINK se puede hacer uso de varias bibliotecas de bloques entre ellas “Simulink Support Package for Arduino Hardware” que se utiliza para la comunicación entre SIMULINK y las placas ARDUINO, con esto se logra recibir y transmitir información entre hardware y software. (Matos, Rodríguez, & Toledo, 2018)

2.10 Control PID

Un regulador o controlador PID es un algoritmo de control que permite manejar un sistema de lazo cerrado para lograr el estado de salida ideal. El controlador PID está formado por tres componentes que proporcionan una operación, proporcional, integral y derivativa. Estos tres componentes son los que dan el nombre al controlador PID. (Cajo & Agila, 2015)

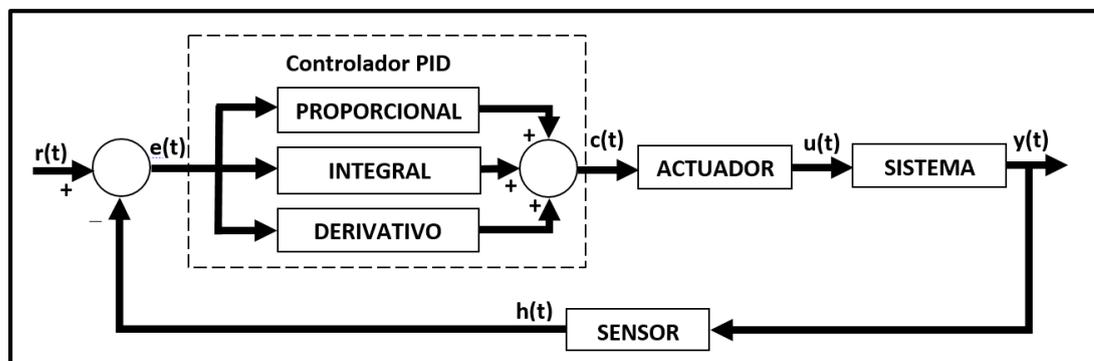


Figura 2. 23: Sistema de control en lazo cerrado con control PID.

2.10.1 Signo de referencia y señal de error

La señal $r(t)$ se conoce como referencia y muestra el estado que desea obtenerse en la salida del sistema $y(t)$. En un sistema de control de posición, la referencia $r(t)$ será la posición deseada y su salida $y(t)$ será la posición real del sistema controlado.

Como se puede encontrar en la figura anterior, la entrada al controlador PID es la señal de error $e(t)$. Esta señal le muestra al controlador la diferencia entre el estado que se desea o la referencia $r(t)$ y la condición real del sistema estimado por el sensor, la señal $h(t)$. Ante la posibilidad de que la señal de error sea muy significativa, implica que la condición del sistema está muy lejos del estado de referencia deseado. En el caso de que el error sea pequeño, implica que el sistema ha alcanzado el estado deseado. (Pardo, 2013)

2.10.2 Control Proporcional

Como su nombre lo indica, este parámetro de control corresponde a una proporción de la señal de error $e(t)$. Dentro del parámetro proporcional se multiplica la señal de error por la constante **K_p**. Con esto se intenta disminuir el error del sistema. En el momento que el error es muy grande, la acción de control es muy grande y, en general, minimiza este error. (Sung, Lee, & Lee, 2009)

Aumentando el parámetro proporcional **K_p** lo acompañan los siguientes efectos:

- Incrementa la velocidad de reacción del sistema.
- Reduce el error del sistema en régimen permanente.
- Incrementar la inseguridad del sistema.

2.10.3 Control Derivativo

Como su nombre lo indica, este parámetro de control corresponde a la derivada proporcional de la señal de error $e(t)$. En el control anterior, cuando la posición se encuentra por debajo, la acción de control proporcional intenta incrementar la posición de manera confiable. El inconveniente viene al considerar las inercias. En un punto donde el sistema se mueva rápidamente hacia el punto de referencia, el sistema pasará de largo debido a su inercia, esto crea sobrepulsos y oscilaciones. Para mantener la estabilidad, el controlador debe saber la velocidad para así tener la opción de detenerlo antes de tiempo y amortiguarse. (Sung et al., 2009)

Aumentando el parámetro derivativo **K_d** lo acompañan los siguientes efectos:

- Incrementa la estabilidad del sistema controlado.
- Reduce un poco la velocidad del sistema.
- El error en régimen permanente continuará como antes.

2.10.4 Control Integral

Este parámetro de control como su nombre lo muestra, corresponde a la integral proporcional de la señal de error $e(t)$. La integral se puede ver como la sumatoria o colección de la señal de error. A largo plazo, se agregan pequeños errores para hacer que el parámetro integral se esté incrementando. Con esto, es posible reducir el error del sistema en régimen permanente. El inconveniente de utilizar el parámetro integral es que agrega una inercia específica al sistema y por lo tanto lo hace cada vez más inestable. (Sung et al., 2009)

Aumentando el parámetro integral K_i tiene lo acompañan los siguientes efectos:

- Disminuye el error del sistema en régimen permanente.
- Incrementar la inestabilidad del sistema.
- Incrementa un poco la velocidad del sistema.

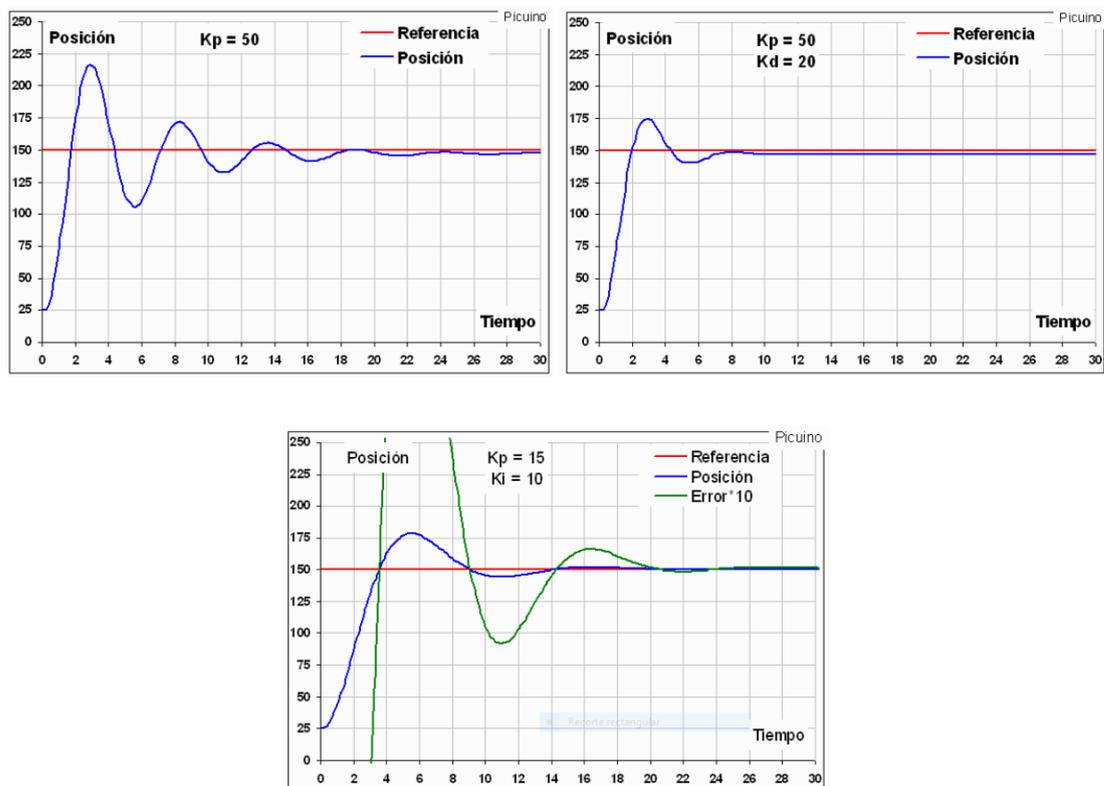


Figura 2. 24: Efectos en la señal modificando parámetros K_p , K_d , K_i . (Pardo, 2013)

2.11 Control FUZZY

Es muy valioso conocer rápidamente cómo se ha desarrollado la teoría control y sus aplicaciones en el área de la lógica difusa. Es una rama de la inteligencia artificial o IA por sus siglas en inglés, que permite a una PC computar datos verdaderos en una escala entre lo verdadero y falso. La lógica difusa ahora es muy normal encontrarla en varias áreas de la innovación tecnológica, tanto en hardware de control, ciencia, autonomía aplicada, etc.

Su objetivo principal es hacer que un sistema dependa de la conducta y el pensar humano, la experiencia que tenga el humano en el trabajo que se desea controlar, es la clave. El sistema toma ese conjunto de conocimientos ya sea de, electrónica, mecánica, industrial, computación, y con esto se establece las reglas para crear la propuesta de control. (Huilocapi Subía, 2015)

2.11.1 Etapas del control FUZZY

El control difuso o FUZZY se compone de tres etapas bien marcadas:

- Fuzzificación
- Base de conocimiento o Conjunto de reglas
- Defuzzificación

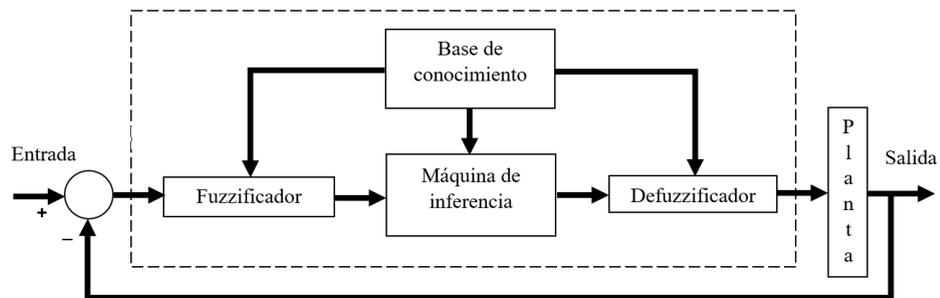


Figura 2. 25: Sistema de control difuso Mamdani.

2.11.2 Interfaz de fuzzificación

Aquí se toman las estimaciones nítidas en tiempo real y se relegan valores difusos en un rango entre cero y uno, es decir, valores que tienen un nivel específico de incertidumbre lingüística, este procedimiento se conoce como fuzzificación. Para definir los grados de pertenencia de las estimaciones nítidas a valores difusos se tiene varias funciones de membresía y estas son las más usadas (Huilocapi Subía, 2015):

- Función singleton
- Función triangular
- Función trapezoidal
- Función gaussiana
- Función sigmoidea

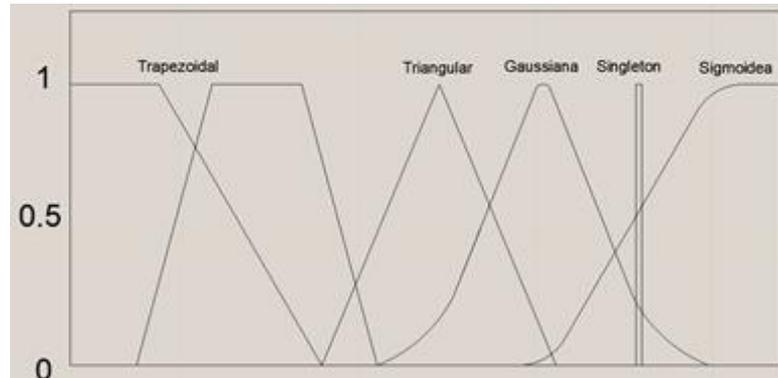


Figura 2. 26: Funciones de membresía más usadas en los controladores difusos.

2.11.3 Base de conocimiento o Conjunto de reglas y Lógica de decisiones

En la base de conocimientos se establece el grupo de reglas lingüísticas, estas se calibran con la experimentación del sistema. El grado de pertenencia de las variables lingüística se evalúa en el grupo de reglas de inferencia. Se establecen los límites del controlador que en nuestro caso son los límites del movimiento de la plataforma inercial de 2-GDL. El núcleo de un controlador difuso depende de la lógica que utiliza para decidir. Como consecuencia de utilizar la lógica de decisiones resulta en conjuntos recortados difusos o conjuntos escalados. (Huilcapi Subía, 2015)

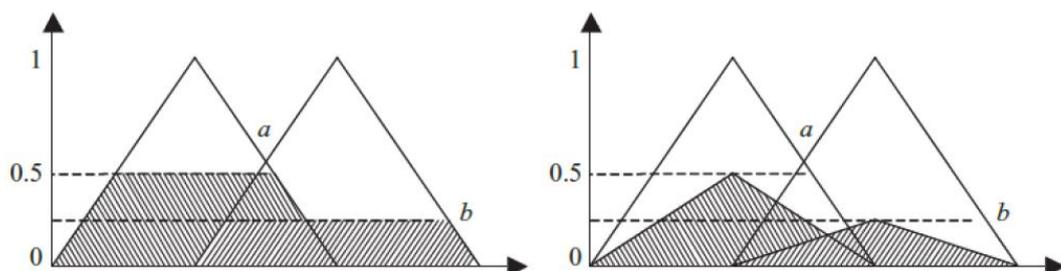


Figura 2. 27: Lógica de decisiones de un controlador difuso.

2.11.4 Interfaz de defuzzificación

Aquí se toma las estimaciones difusas del fuzzificador y las transforma en valores nítidos, este procedimiento se conoce como defuzzificación, por lo que el sistema comprende las órdenes y desarrollará las actividades que el humano experto haya preparado. La defuzzificación es un proceso más complejo que la fuzzificación porque existen varios métodos matemáticos para realizarlo y presentar las conclusiones basadas en los conjuntos difusos. Algunos de los principales son: el método del centro de gravedad, método del promedio de los centros, método de máximos, entre otros. (Huilcapi Subía, 2015)

2.12 Diseño de Controladores

Los controladores son la base para el manejo y monitoreo de sistemas automatizados, estos van mejorándose día a día con la investigación, el objetivo es tener nuevas maneras de controlar y llegar a mejores resultados de implementación y eficiencia. Matlab presenta varias herramientas para el diseño de controladores utilizando tiempo continuo y discreto, así como herramientas para el diseño de controladores utilizando lógica difusa.

2.12.1 Diseño de Controladores P, PI, PID

Para diseñar un algoritmo de control analógico o digital PID, usando de variables de estado o algún otro método dentro de la teoría de control clásico. En Simulink se puede encontrar las herramientas como bloques dentro de su librería >> Continuo, también dentro de esta librería se tiene bloques para la identificación de plantas y sistemas.

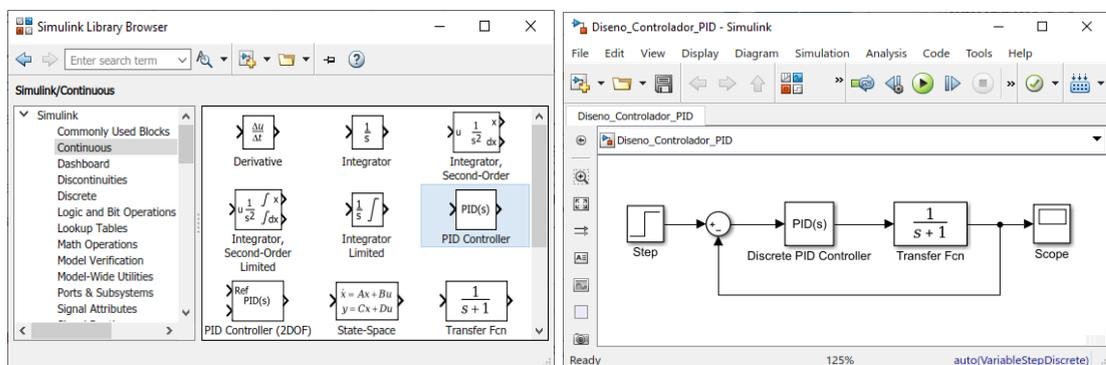


Figura 2. 28: Bloque “PID” en un sistema de lazo cerrado de Simulink.

Como se puede ver dentro del bloque Controlador PID se tiene: qué tipo de controlador se desea utilizar, si se desea trabajar con tiempo continuo o discreto, tiempo de muestreo, cambiar los valores de los parámetros de control y hasta definir una saturación para la salida de dicho controlador.

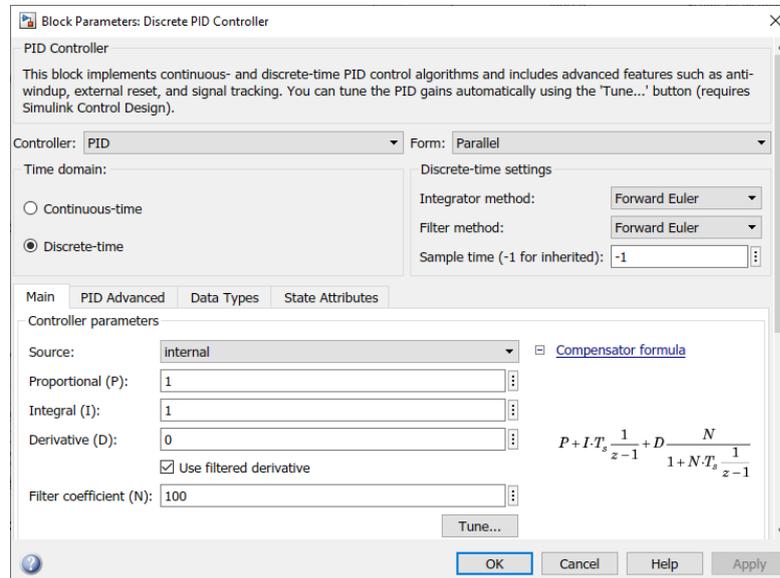


Figura 2. 29: Paramentos del bloque “PID Controller”.

Este bloque además contiene una herramienta para la sintonización automática de los valores P, I, D, donde se puede variar el tiempo de respuesta y comportamiento transitorio como desee. Se observa una gráfica con línea entrecortada de la respuesta a un escalón y otra gráfica con la sintonización que esta herramienta logra.

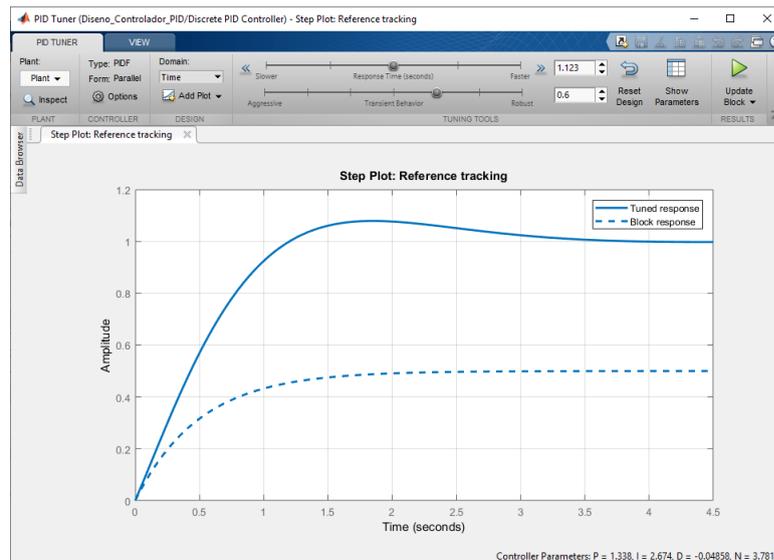


Figura 2. 30: Herramienta de sintonización de PID en el bloque “PID Controller”.

2.12.2 Diseño de Controladores FUZZY

Para diseñar un algoritmo de control difuso en Matlab/Simulink se debe ingresar el comando “fuzzy” en la ventana de comandos de Matlab con lo cual se abrirá el “Diseñador de Lógica Difusa”. Aquí se puede crear las variables de entrada y salida, asignar las funciones de membresía, crear el grupo de reglas, entre otros detalles para el controlador. El método de defuzzificación que se usa por defecto es el de centro de área.

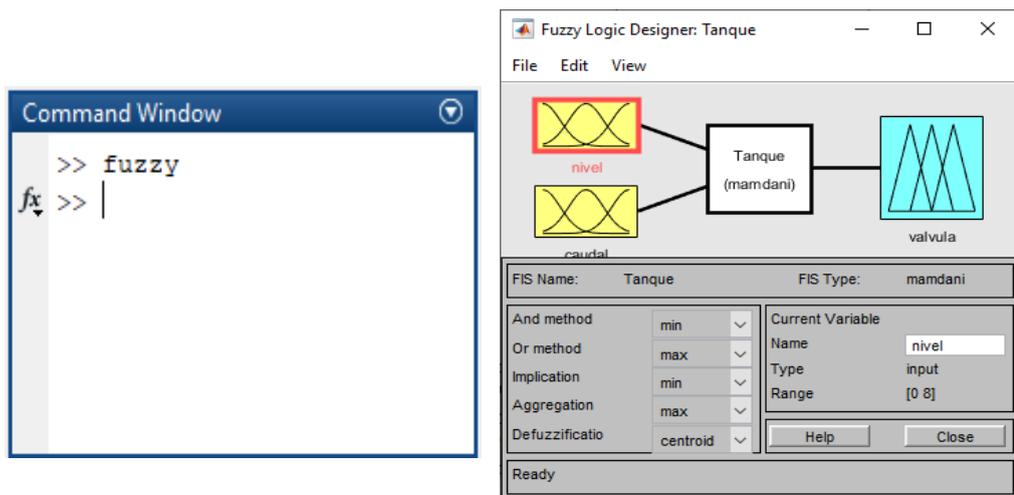


Figura 2. 31: Ejecución del comando “fuzzy” en la ventana de comandos Matlab.

En el diseñador de lógica difusa se tiene una gama de editores, uno de estos es el de las funciones de membresía donde se puede agregar, nuevas variables, nombre, tipo, parámetros, rangos y editar la visualización de las gráficas.

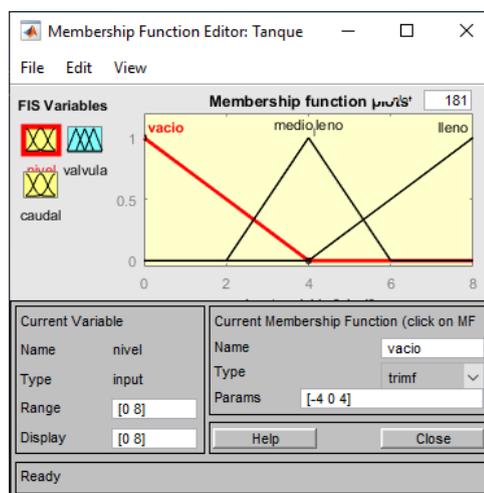


Figura 2. 32: Ventana para editar las funciones de membresía.

Posteriormente de haber creado las variables de entrada y salida con sus respectivas funciones de membresía, se debe crear el conjunto de reglas que asocian las variables, como ya se ha mencionado anteriormente. El trabajo de este conjunto de reglas será óptimo tanto como el diseñador del controlador conozca el sistema.

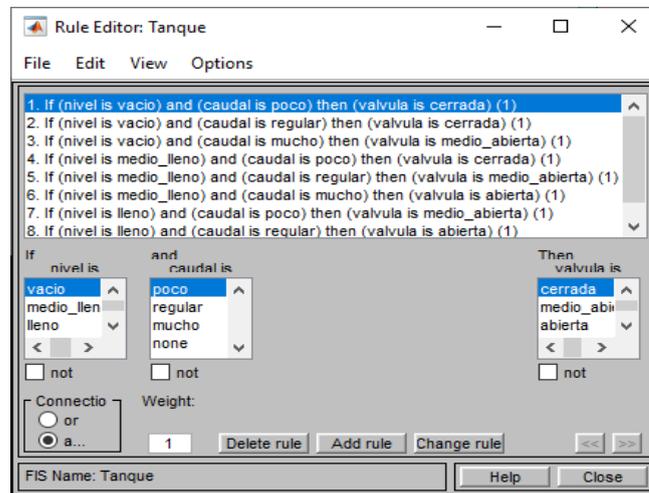


Figura 2. 33: Ventana para editar el conjunto de reglas.

Después de realizar la creación de entradas, salidas y reglas mencionadas anteriormente, ya el controlador difuso está diseñado en su totalidad, ahora se puede hacer una prueba del sistema ingresando en View >> Rules para verificar los valores de salida, modificando los valores de las variables de entrada. Para ver la gráfica total se ingresa en View >> Surface.

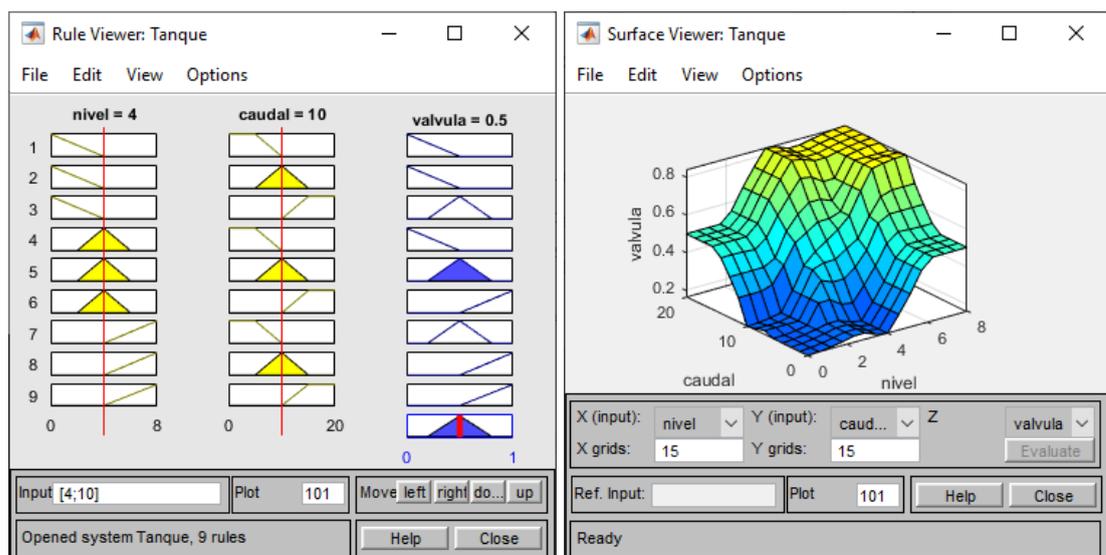


Figura 2. 34: Ventanas para probar y visualizar el efecto del controlador difuso.

Ahora que se tiene el controlador creado y probado, se va a exportar el “archivo.fis” que se lo llama desde el bloque del controlador de lógica difusa y se usa en el control de la planta en cuestión. A continuación, se muestra una planta con su bloque controlador de lógica difusa.

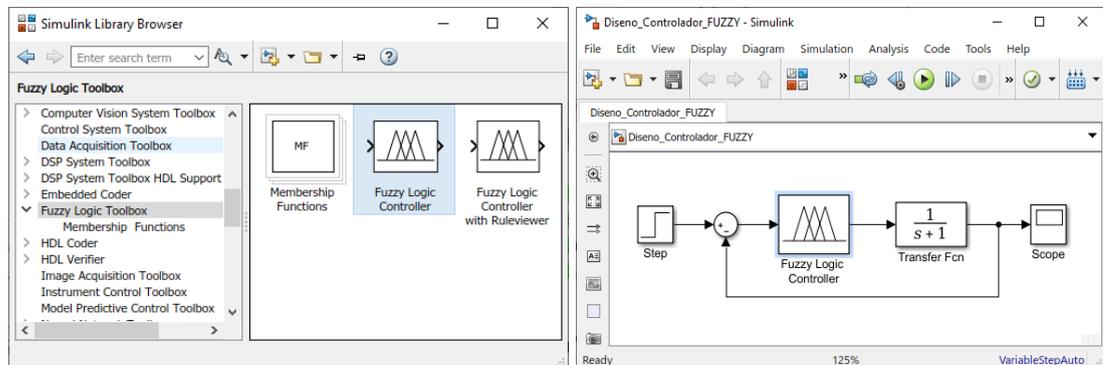


Figura 2. 35: Bloque “FUZZY” en un sistema de lazo cerrado de Simulink.

Se indica la forma adecuada de llamar el “archivo.fis” desde el bloque de control. Es importante mencionar que el “archivo.fis” debe estar en la misma carpeta del “archivo.slx” de Simulink para un correcto funcionamiento del control.

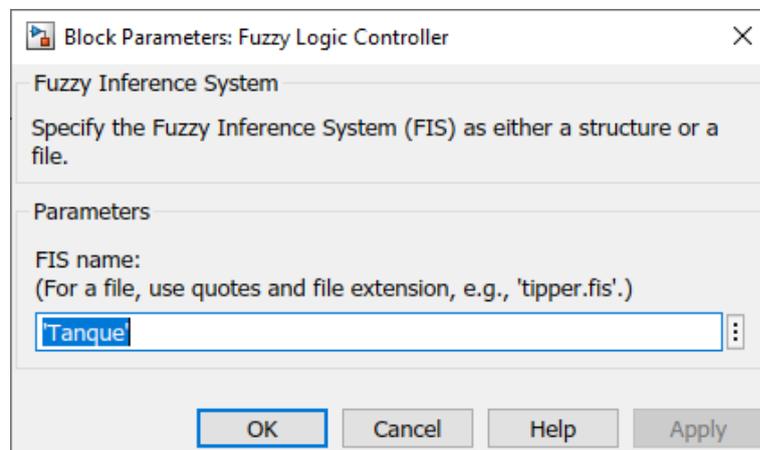


Figura 2. 36: Paramento “FIS name” del bloque FUZZY Logic Controller.

3. MARCO METODOLÓGICO

El proyecto se inicia realizando el diagnóstico de las partes mecánicas y electrónicas de la Plataforma de 2-GDL, con el objetivo de repotenciar dichas partes para la implementación de las guías prácticas empleando el controlador PID y FUZZY.



Figura 3. 1: Plataforma Inercial 2-GDL, vista frontal.

3.1 Diagnóstico de la Plataforma de 2-GDL

Para la ejecución del diagnóstico se energiza la plataforma inercial de 2-GDL y se comprueba el funcionamiento de sus partes electrónicas y mecánicas lo cual se detalla a continuación.

3.1.1 Estructura Mecánica

La estructura mecánica de la plataforma inercial de 2-GDL cuenta con deterioro en los tornillos de los acoples utilizados para los motores 1 y 2.



Figura 3. 2: Plataforma Inercial 2-GDL, acoples.



Figura 3. 3: Tornillos de acoples dañados.

3.1.2 Motores Reductores DC con Encoder

En la plataforma de 2-GDL cuenta con dos motores reductores DC con encoder marca Pololu, a continuación, se muestra el siguiente resultado:

- Los motores reductores cuentan con daño en los engranes ya que los tornillos que lo sujetan obstruyen el movimiento de ellos.
- En la evaluación de los motores reductores se notó, que para el movimiento se debe usar un controlador Puente H. La tarjeta en mención utiliza la señal PWM para el control de los motores.
- Se detecta que los encoder poseen un funcionamiento correcto.



Figura 3. 4: Diagnóstico de los motores reductores dc con encoder.

3.1.3 Pantalla táctil Resistiva

La Pantalla táctil resistiva marca NKK Switches posee comunicación RS232 con un controlador que solo funciona en Windows XP, al ser este un sistema operativo discontinuado se necesita crear un nuevo controlador que se comunique con las nuevas versiones del software Matlab/Simulink.

Los pines del conector de comunicación presentan mal estado como se observa en la figura 3.6 ocasionando que la adquisición de datos no sea el correcto.

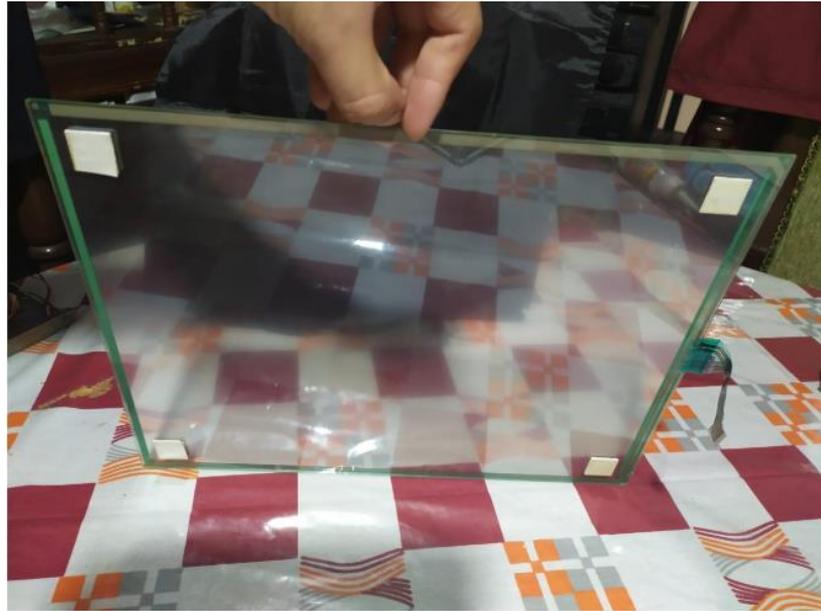


Figura 3. 5: Diagnóstico de pantalla táctil resistiva.

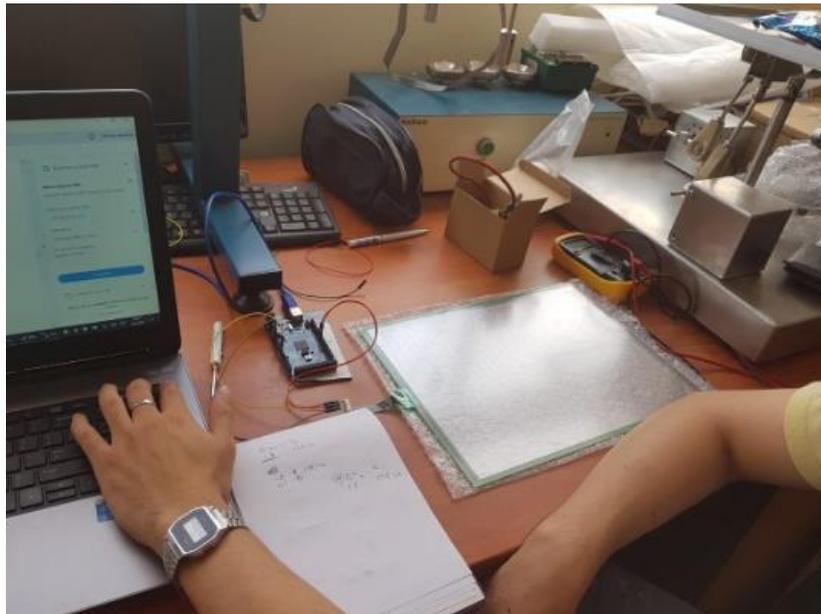


Figura 3. 6: Conector pantalla táctil resistiva.

3.1.4 Acelerómetro

El Acelerómetro marca Pololu no presentó novedades en el diagnóstico y se corroboró su funcionamiento apropiado.

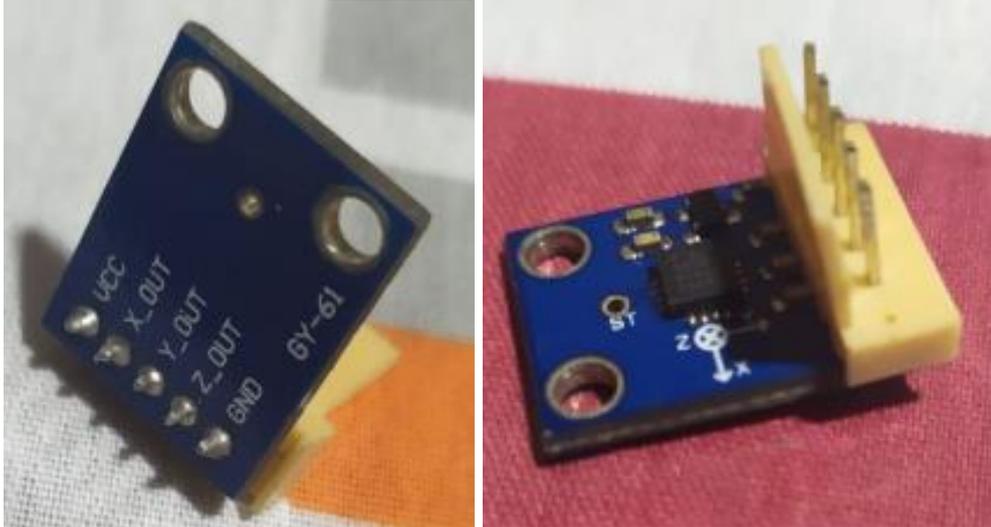


Figura 3. 7: Acelerómetro, vista de los pines.

3.1.5 Tarjeta PCI

La tarjeta PCI con ayuda de su ficha técnica se evidenció su apropiado desempeño.



Figura 3. 8: Tarjeta PCI.

3.1.6 SparkFun

Al realizar el diagnóstico de la tarjeta SparkFun se utilizó la hoja de datos y como resultado se comprobó su óptimo funcionamiento.

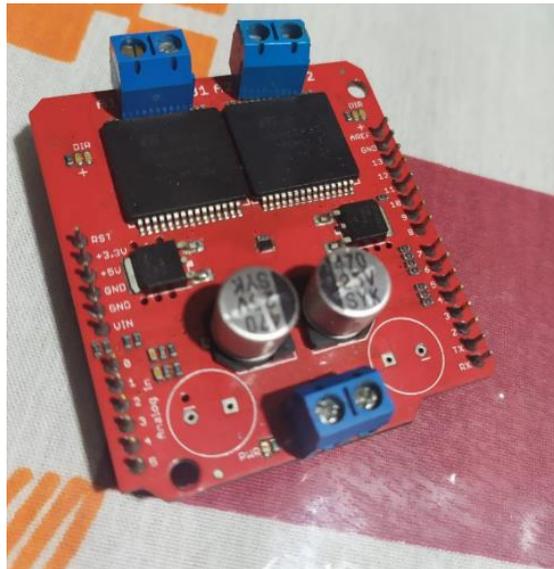


Figura 3. 9: Tarjeta SparkFun.

3.1.7 PCB (Tarjeta de Circuito Impreso)

La tarjeta PCB (Tarjeta de Circuito Impreso) no consta con su hoja de datos ni el manual de conexiones. Para la ejecución del diagnóstico se realizó la puesta en marcha de la plataforma inercial de 2-GDL la cual tiene movimiento de sus brazos. Se concluye que la tarjeta PCB cuenta con un correcto funcionamiento.



Figura 3. 10: Pistas de la tarjeta PCB, vista posterior.



Figura 3. 11: Tarjeta PCB, vista superior.

3.1.8 Fuentes de Voltaje

La plataforma inercial de 2-GDL utiliza dos fuentes de poder:

- **Fuente de 12VDC/5Amp**, alimenta las tarjetas electrónicas y como se muestra en la figura 3.13 el estado de la fuente es correcto, su voltaje de salida es de 12 voltios con una corriente de 5 amperios



Figura 3. 12: Fuente de 12vdc/5Amp.

- **Fuente de 12VDC/30Amp**, alimenta los motores reductores y como se muestra en la figura 3.14 el estado de la fuente es correcto, su voltaje de salida es de 12 voltios con un corriente de 30 amperios



Figura 3. 13: Fuente de 12vdc/30Amp.

3.2 Ejecución de la Repotenciación

Las investigaciones científicas que estudian los movimientos de las plataformas inerciales se enfocan con un diseño particular de su estructura, las cuales ayudan al movimiento de sus brazos y equilibrio de la esfera. Parte de la repotenciación es el diseño de la estructura mecánica y a continuación se muestra en la figura 3.15 el nuevo diseño de la plataforma inercial de 2-GDL.

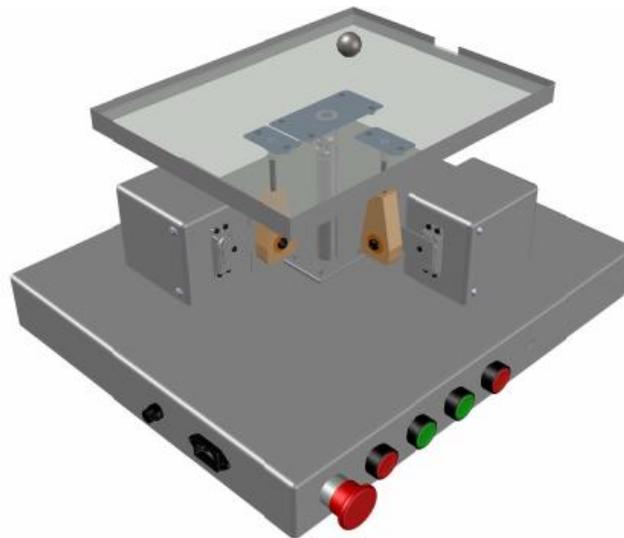


Figura 3. 14: Diseño de la Proforma Inercial 2-GDL, vista isométrica-

Las medidas de las diferentes partes de la estructura mecánica de la plataforma inercial de 2-GDL se detallan en la figura 3.16.

Se reemplaza los motores reductores DC con encoder por los servomotores marca FAN MODEL modelo FS-20W. La nueva ubicación de los servomotores se observa en la figura 3.17 con sus respectivos brazos para transmisión del movimiento.

Se realiza la importación de la pantalla táctil resistiva marca NKK Switches ya que la actual tiene daño en los pines del conector de comunicación.



Figura 3. 17: Servomotor marca Fan Model.

Para la creación del nuevo controlador de la pantalla táctil se utiliza un microcontrolador marca Arduino modelo NANO.



Figura 3. 18: Pantalla Táctil Resistiva.

Se selecciona el microcontrolador marca Arduino modelo DUE para la comunicación entre la pantalla táctil resistiva y los servomotores ya que cuenta con una librería académica desarrollada en el software Matlab/Simulink.



Figura 3. 19: Tarjeta Arduino DUE.

Para un mejor control físico de la marcha, paro y el botón de paro de emergencia se realizó la instalación de los siguientes elementos:

- Botón tipo hongo para el paro de emergencia de color rojo
- Botón tipo pulsador para el paro de color rojo.
- Botón tipo pulsador para la marcha de color verde.
- Luz piloto color verde para mostrar que la plataforma esta puesta en marcha.
- Luz piloto color rojo para mostrar que la plataforma está encendida.

El paro de emergencia cuando está enclavado tiene como funcionamiento la desenergización de la plataforma de 2-GDL por lo tanto la luz piloto color rojo está apagado. En la figura 3.21 se muestra la ubicación de los botones de control.

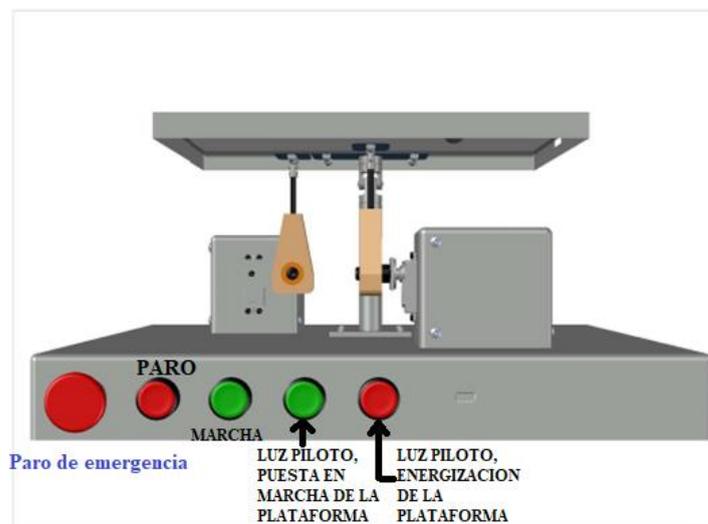


Figura 3. 20: Ubicación de los botones del control físico.

A continuación, en la figura 3.22 se muestra el resultado obtenido al realizar la repotenciación de sus partes mecánicas y electrónicas ya antes mencionadas.



Figura 3. 21: Rediseño de la Proforma Inercial 2-GDL.

La plataforma inercial de 2-GDL utiliza los siguientes elementos para su control: una esfera de acero con 4cm de diámetro y 92.3 gramos de peso, una pantalla táctil de 15 pulgadas resistiva de 4 cables, una placa arduino NANO como controlador de la pantalla, dos servomotores de 20 kgf, una placa arduino DUE como medio de comunicación, y el software Matlab/Simulink donde se diseña y analiza los controladores PID y FUZZY.

3.3 Diseño e Implementación de los Algoritmos de Control PID y Fuzzy

Para la creación del diseño del control automático es primordial realizar la identificación del sistema MIMO existente en la plataforma inercial de 2-GDL, el cual implica entender todas las variables de entrada y las variables de salida al poner en marcha nuestra plataforma. El sistema MIMO por cada grado de libertad que tiene la plataforma cuenta con un sistema SISO.

A continuación, se muestra el diagrama de bloque de cada sistema SISO.

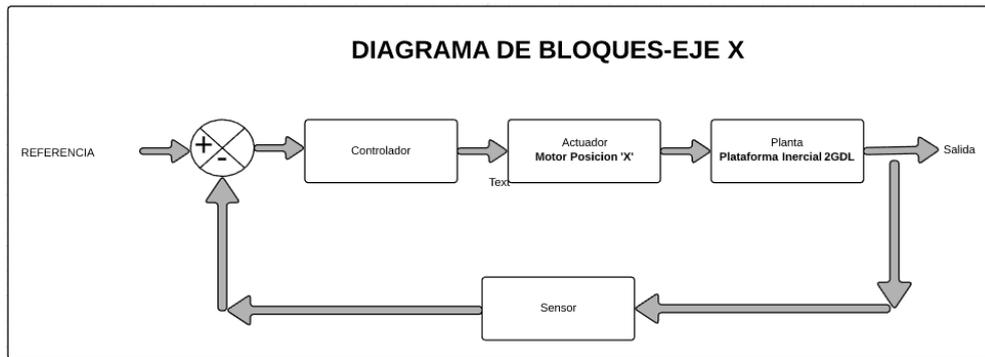


Figura 3. 22: Diagrama de bloques del sistema de control en el Eje X.

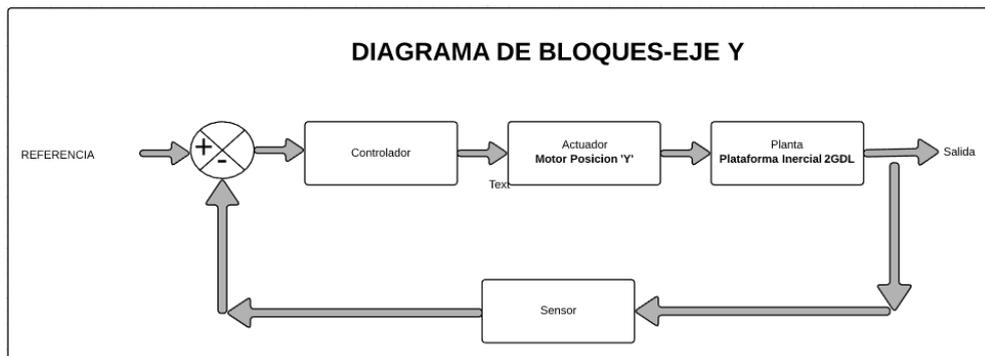


Figura 3. 23: Diagrama de bloques del sistema de control en el Eje Y.

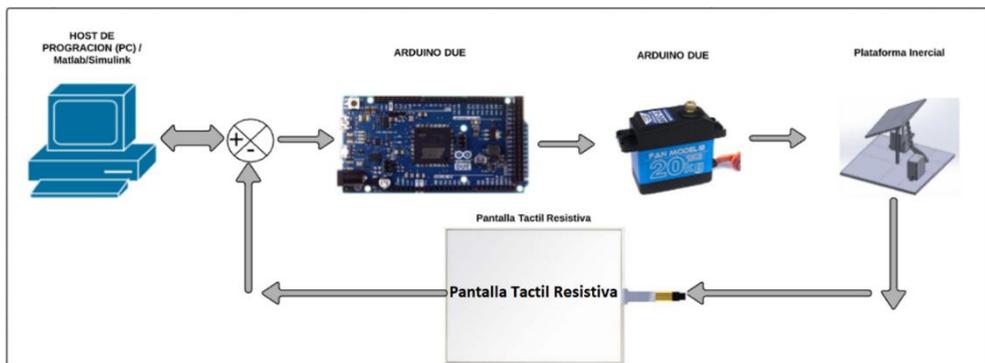


Figura 3. 24: Diagrama de bloques del sistema de control.

3.3.1 Pantalla Táctil Resistiva y controlador

El sensor de nuestra plataforma inercial de 2-GDL es la pantalla táctil resistiva, las características principales son:

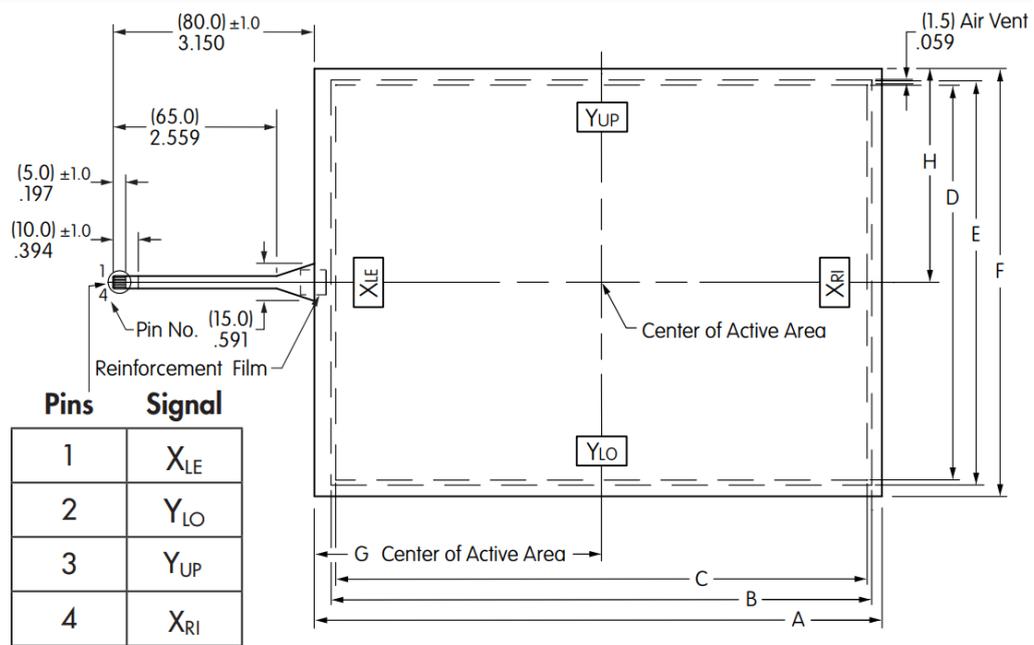


Figura 3. 25: Dimensiones de la pantalla táctil.

- Dimensión 15 Pulgadas.
- Voltaje de operación: 5 Voltios DC.
- 4 pines de trabajo:
 - PIN 1, posición XLE
 - PIN 2, posición YUP
 - PIN 3, posición XRI
 - PIN 4, posición YLO

En la figura 3.26 se observa las dimensiones y ubicaciones de los pines de la pantalla táctil.

Para la lectura de la posición Y se energiza con 5 voltios DC el pin 2 y GND el pin 4, la posición se la adquiere en el pin 3 en voltios. Para la lectura de la posición X se energiza con 5 voltios DC el pin 1 y GND el pin 3 la posición se la adquiere en el pin 2 en voltios, el fabricante recomienda que el pin restante sea conectado a GND y en la figura 3.27 se muestra lo antes mencionado.

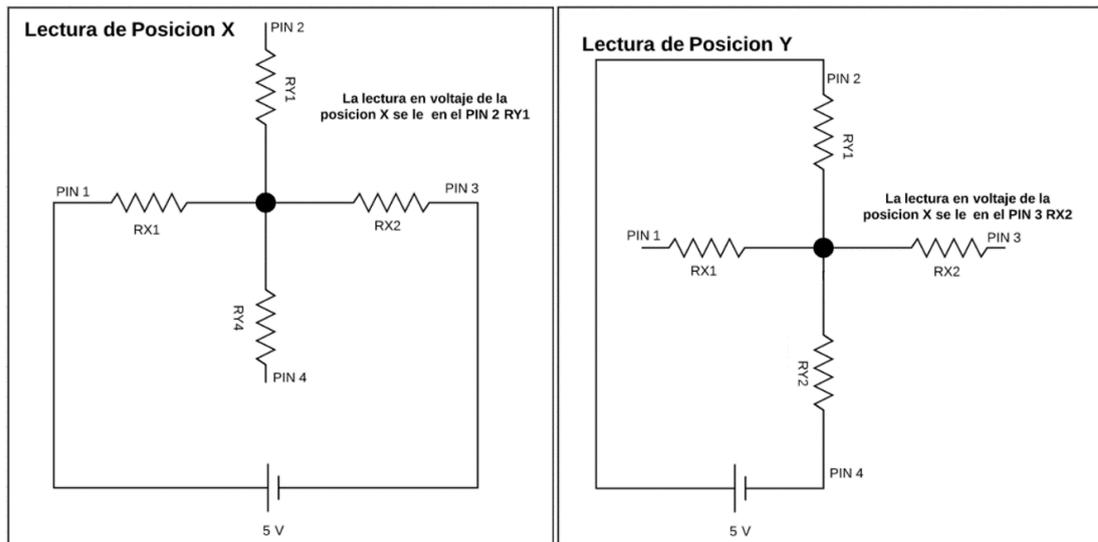


Figura 3. 26: Diagrama de conexiones para la obtención de la posición.

Para obtener las posiciones del eje X y del eje Y en tiempo real se debe realizar una programación que se ejecute en un ciclo infinito de veces alternando la energización de los pines y no dañar la pantalla táctil. Dicho programa se desarrolló en el software Arduino y se ejecuta en el Arduino NANO. A continuación, se expone el código del programa.

```
#define YU A0
#define XR A1
#define YD A2
#define XL A3
#define WPx 9
#define WPy 10
int X = 0; int XReal = 0;
int Y = 0; int YReal = 0;

void setup()
{pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);}

void loop()
{ pinMode(XR,INPUT);
  pinMode(XL,INPUT);
  digitalWrite(XL,LOW);
  pinMode(YU,OUTPUT);
```

```

pinMode(YD,OUTPUT);
digitalWrite(YU,HIGH);
digitalWrite(YD,LOW);
delay(5); X = analogRead(XR);
XReal = map(X , 0, 1023, 0, 185);
analogWrite(WPx,XReal);
/*Serial.print("X = ");
Serial.print(X);
Serial.print(", ");*/
pinMode(YU,INPUT);
pinMode(YD,INPUT);
digitalWrite(YU,LOW);
pinMode(XR,OUTPUT);
pinMode(XL,OUTPUT);
digitalWrite(XL,HIGH);
digitalWrite(XR,LOW);
delay(5);
Y = analogRead(YD);
YReal = map(Y , 0, 1023, 0, 185);
analogWrite(WPy,YReal);
/*Serial.print("Y = ");
Serial.println(Y);
Serial.flush();*/}

```

Los pines para la adquisición de datos utilizados en el arduino NANO son los siguientes:

Pines de lectura:

- PIN1 de la pantalla táctil-Pin Analógico A0 Arduino NANO
- PIN2 de la pantalla táctil-Pin Analógico A1 Arduino NANO
- PIN3 de la pantalla táctil-Pin Analógico A2 Arduino NANO
- PIN4 de la pantalla táctil-Pin Analógico A3 Arduino NANO

Pines de salida que se envía la señal PWM del eje X y del eje Y:

- Pin Digital 9 para la posición X
- Pin Digital 10 para la posición Y

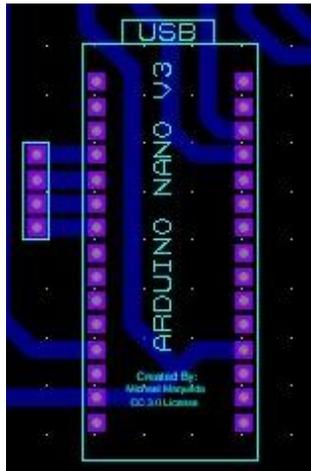


Figura 3. 27: Microcontrolador Arduino NANO

Con la ayuda de dos filtros pasa bajo se realiza la conversión de las señales PWM tanto de la posición X y de la posición Y a señales analógicas. Cabe recalcar que una salida PWM es una señal Digital.

Para la construcción de los filtros Pasa Bajo se utiliza los siguientes elementos:

- 1 Resistencia
- 1 Capacitor

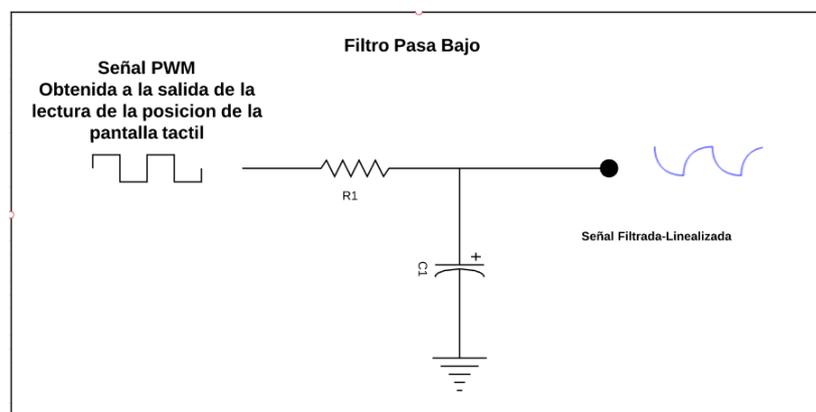


Figura 3. 28: Diseño del filtro Pasa bajo.

Se realiza el cálculo para la obtención de los valores de resistencia y capacitancia necesarias para un filtro que ayude a convertir la señal digital analógica. Los valores de los elementos electrónicos para el diseño del, filtro pasa bajo son:

- $R1= 1K\Omega$
- $C1= 2.2\mu F$

Cabe recalcar que se debe diseñar dos filtros pasa bajo tanto para el eje X y para el eje Y, ambos filtros están diseñados con los mismos valores de resistencia y capacitancia. El valor de voltaje máximo de la señal de PWM es de 5 Voltios DC, con este valor de voltaje se realiza los cálculos del filtro que permita que la señal PWM se convierta a una señal analógica.

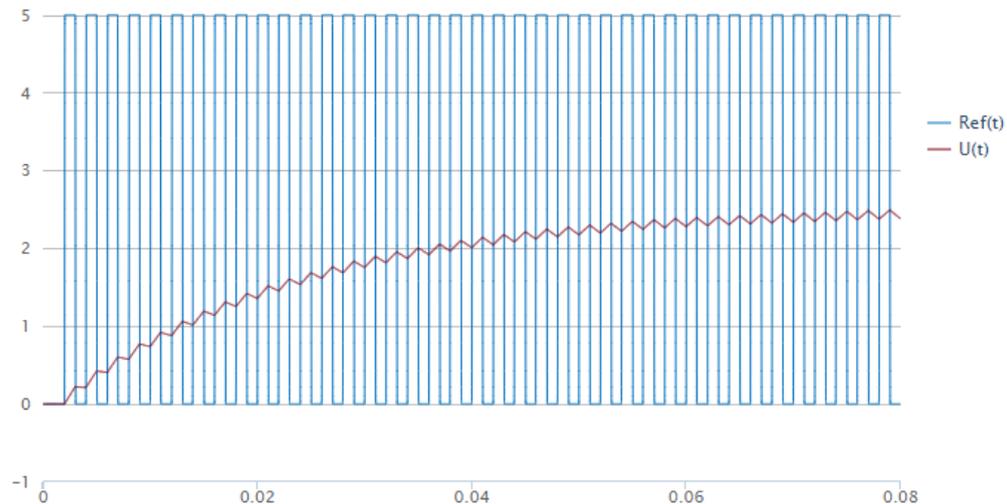


Figura 3. 29: Señal PWM filtrado con Pasa Bajo.

Para evaluar el funcionamiento del filtro diseñado se utiliza la ayuda del software Matlab y el Arduino NANO y se muestra la gráfica obtenida en la figura. Dicho filtro será incorporado a la tarjeta PCB.

La característica de la señal son las siguientes:

- Los valores de frecuencia de corte obtenido son 7.2343 Hz
- El voltaje promedio con rizado es de 2.5 voltios
- El rizado 0.1136 Voltios

3.3.2 Servomotores

Los servomotores ejecutan los movimientos de la plataforma inercial de 2-GDL tanto en los ejes X y Y. Los servomotores marca Fan Model son utilizados para la plataforma inercial de 2-GDL.



Figura 3. 30: Servomotor marca Fan Model.

La característica de dichos servomotores se muestra a continuación:

- Torque (4.8v/6.0v/7.4V): 16.0 kg-cm (306 oz/in) | 18.0 kg-cm (333 oz/in) | 20.0 kg-cm (347 oz/in)
- Velocidad (4.8v/6.0v/7.4V): 0.18 sec/60° | 0.16 sec/60° | 0.14 sec/60°
- Rango de voltaje operativo: 4.8 ~ 7.4 voltios DC
- Corriente sin carga: <500mA
- Spline: 25T(6mm de diámetro)
- Tipo de motor: Motor sin núcleo
- Tipo de rodamiento: Rodamiento de bolas x 2
- Tipo de engrane: Aleación de acero
- Temperatura: -20°C~60°C
- Longitud del cable conector: 320mm/12.6in
- Carcasa: plástico y aluminio
- Peso: 65 g (2.3 oz)
- Dimensiones: 40 x 20.5 x 40 mm (1.57 x 0.78 x 1.57 in)
- Ángulo de límite: 180°± 10°
- Rango de funcionamiento: 90°(1000~2000 μsec)
- Método de control: PWM
- Rango del ancho de pulso(0°~180°): 500~2500 μsec
- Relación de trabajo: 0.5ms~2.5ms
- Periodo de pulso: 20ms
- Ancho de banda muerto: 4 μsec

Para el control de los movimientos de los servomotores se utiliza la comunicación entre el Arduino DUE y Matlab/Simulink, es necesario la instalación de la librería de Arduino para Matlab/Simulink como se muestra en la figura 3.32.



Figura 3. 31: Librería de Arduino para Simulink.

La figura 3.33 muestra la librería de Arduino instalado en Simulink. Estos bloques fueron utilizados para el diseño de los diferentes algoritmos de control que se estudia en este trabajo de grado.

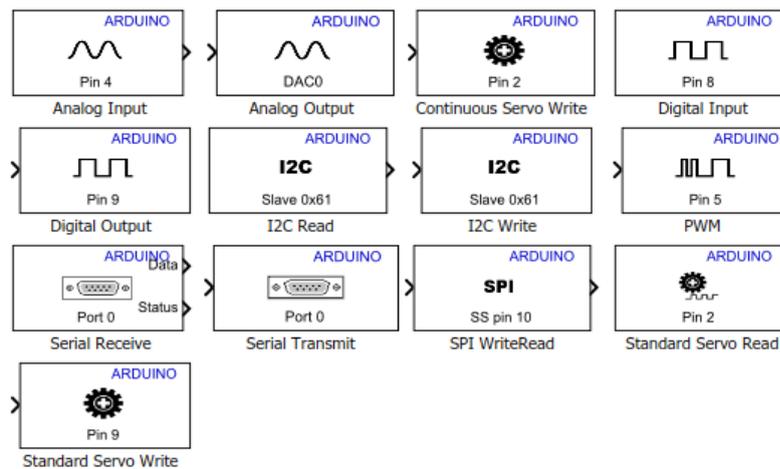


Figura 3. 32: Bloques de la librería de Arduino instalada en Matlab-

El bloque que se utiliza para el movimiento de los servomotores es el Standard Servo Write que se expone en la figura 3.34 de la librería de Arduino en Simulink. El bloque Standard Servo Write envía la posición angular al pin de la tarjeta arduino especificado en el bloque.

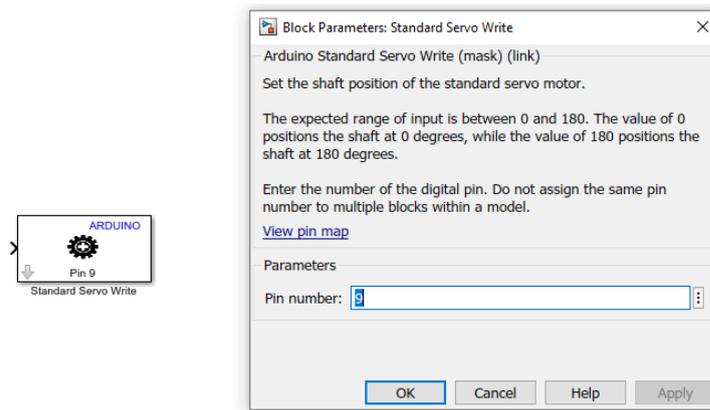


Figura 3. 33: Característica del bloque Standard Servo Write.

A continuación, se muestra los pines seleccionados para la comunicación de los servomotores en el arduino DUE:

- Pin Digital 9 para el servomotor X.
- Pin Digital 10 para el servomotor Y.

El bloque Standard Servo Write trabaja conectando un bloque constante para el envío de la posición angular de los servomotores, el valor que se envía está en el rango de 0 a 180.

3.3.3 Arduino DUE

La tarjeta Arduino DUE es la interfaz para la adquisición de datos de la lectura de la pantalla y él envió de la señal de control a los servomotores.

A continuación, se describe los pines a utilizar.

Puertos Analógicos para la adquisición de datos de la pantalla táctil:

- Pin Analógico A0 del Arduino DUE.
- Pin Analógico A1 del Arduino DUE.

Puerto Digitales para el envío de posicionamiento angular de los servomotores:

- Pin Digital 9 para el servomotor X.
- Pin Digital 10 para el servomotor Y.

De esta manera mostramos el diseño final de nuestra tarjeta PBC en la figura 3.35.

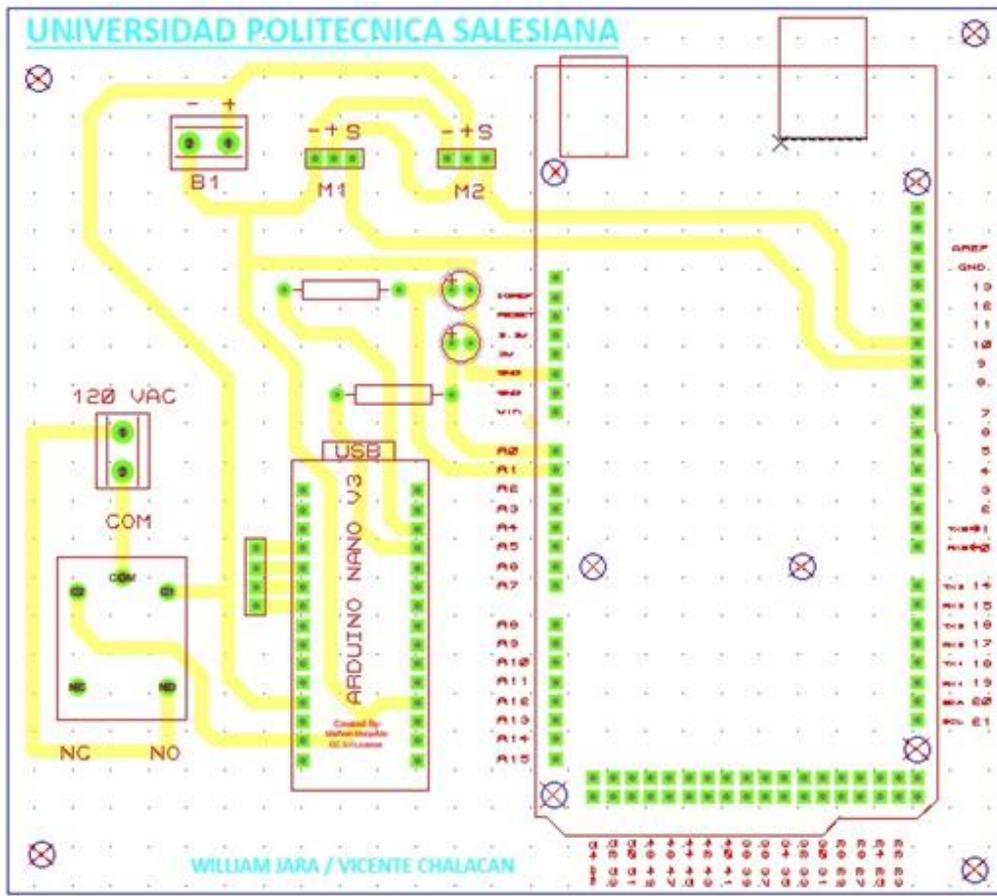


Figura 3. 34: Tarjeta PBC para la actuación de la Plataforma Inercial de 2-GDL.

3.3.4 Identificación de la Planta

La plataforma Inercial de 2 GDL, tiene como entrada del sistema el sensor de la pantalla táctil resistiva y la salida es el ángulo de los servomotores el cual afecta a la posición de la pantalla táctil en los ejes X y Y, dicho ángulo es obtenido mediante la posición real de la bola que se mueve en la pantalla táctil.

Para la identificación de la planta se debe crear una variable conocida que simula la posición de la bola en la pantalla la cual realiza el movimiento de los ángulos de los servomotores. Dicha variable debe ser una señal que permita simular la posición de la bola. La señal tiene como nombre PRBS y su realización en el software Matlab.

La señal PRBS, que posee el trabajo de titulación, tiene como característica fundamental el rango de operación de los servomotores, estos a su vez trabajan en grados (0 a 180).

Cabe recalcar que cada servomotor tiene un rango de operación distinta por su ubicación como se muestra en la figura 3.17.

A continuación, se muestra las características de la señal PRBS por cada servomotor:

Servomotor X, su rango de operación es de 90° a 150° donde su centro de equilibrio es de 120° , considerando que en este rango de operación se debe tener claro la protección al momento de identificar la planta.

La señal PRBS que se envía al servomotor X con lo antes mencionado es la siguiente. (Cárdenas Ibáñez & Peñaranda Idrovo, 2019)

```
disp('CREACION DE UNA SEÑAL PRBS');
clear PRBS
teta=120; %valor nominal de la referencia
umax=5; %valor máximo positivo de la variación porcentual de la referencia.
umin=5; %valor mínimo positivo de la variación porcentual de la referencia.
PRBS = idinput(500, 'PRBS', [0 0.75], [teta-umin*teta/100 teta+umax*teta/100]);
L=length(PRBS);
senal=double([(0:L-1)',PRBS]);
```

Servomotor Y, su rango de operación es de 20° a 80° donde su centro de equilibrio es de 50° considerando que en este rango de operación se debe tener claro la protección al momento de identificar la planta.

La señal PRBS que se envía al servomotor Y con lo antes mencionado es la siguiente.

```
disp('CREACION DE UNA SEÑAL PRBS');
clear PRBS
teta=50; %valor nominal de la referencia
umax=5; %valor máximo positivo de la variación porcentual de la referencia.
umin=5; %valor mínimo positivo de la variación porcentual de la referencia.
PRBS = idinput(500, 'PRBS', [0 0.75], [teta-umin*teta/100 teta+umax*teta/100]);
L=length(PRBS);
senal=double([(0:L-1)',PRBS]);
```

Se expone el valor de la señal de PBRs, generada para el servomotor en X y el servomotor Y en los tiempos detallados en las siguientes tablas.

Motor X	
Tiempo	Grados
1	114
2	114
3	114
4	114
5	114
6	114
7	114
8	114
9	114
10	126
11	126
12	126
13	126
14	114
15	114
16	114
17	114
18	126
19	114
20	114
21	114
22	126
23	126
24	126
25	126
26	114
27	126
28	114
29	114
30	126
31	126
32	114

33	114
34	126
35	114
36	114
37	126
38	114
39	114
40	114
41	114
42	126
43	114
44	126
45	126
46	126
47	126
48	114
49	114
50	114
51	126
52	126
53	114
54	114
55	126
56	126
57	126
58	126
59	114
60	126
61	126
62	114
63	126
64	126
65	126
66	114

67	126
68	114
69	126
70	114
71	114
72	114
73	126
74	114
75	126
76	114
77	114
78	114
79	114
80	126
81	126
82	114
83	126
84	126
85	114
86	126
87	114
88	114
89	114
90	126
91	126
92	114
93	114
94	114
95	126
96	126
97	126
98	126
99	126
100	126

Tabla 1: Datos generados de la señal PRBS-Motor X.

Motor Y	
Tiempo	Grados
1	47,5
2	47,5
3	47,5
4	47,5
5	47,5
6	47,5
7	47,5
8	47,5

9	47,5
10	52,5
11	52,5
12	52,5
13	52,5
14	47,5
15	47,5
16	47,5
17	47,5
18	52,5

19	47,5
20	47,5
21	47,5
22	52,5
23	52,5
24	52,5
25	52,5
26	47,5
27	52,5
28	47,5

29	47,5
30	52,5
31	52,5
32	47,5
33	47,5
34	52,5
35	47,5
36	47,5
37	52,5
38	47,5
39	47,5
40	47,5
41	47,5
42	52,5
43	47,5
44	52,5
45	52,5
46	52,5
47	52,5
48	47,5
49	47,5
50	47,5
51	52,5
52	52,5

53	47,5
54	47,5
55	52,5
56	52,5
57	52,5
58	52,5
59	47,5
60	52,5
61	52,5
62	47,5
63	52,5
64	52,5
65	52,5
66	47,5
67	52,5
68	47,5
69	52,5
70	47,5
71	47,5
72	47,5
73	52,5
74	47,5
75	52,5
76	47,5

77	47,5
78	47,5
79	47,5
80	52,5
81	52,5
82	47,5
83	52,5
84	52,5
85	47,5
86	52,5
87	47,5
88	47,5
89	47,5
90	52,5
91	52,5
92	47,5
93	47,5
94	47,5
95	52,5
96	52,5
97	52,5
98	52,5
99	52,5
100	52,5

Tabla 2: Datos generados de la señal PRBS-Motor Y.

Las señales PRBS tienen una variación del 5% desde su centro de equilibrio, a continuación, se muestran la señal obtenida tanto para el servomotor X y el servomotor Y.

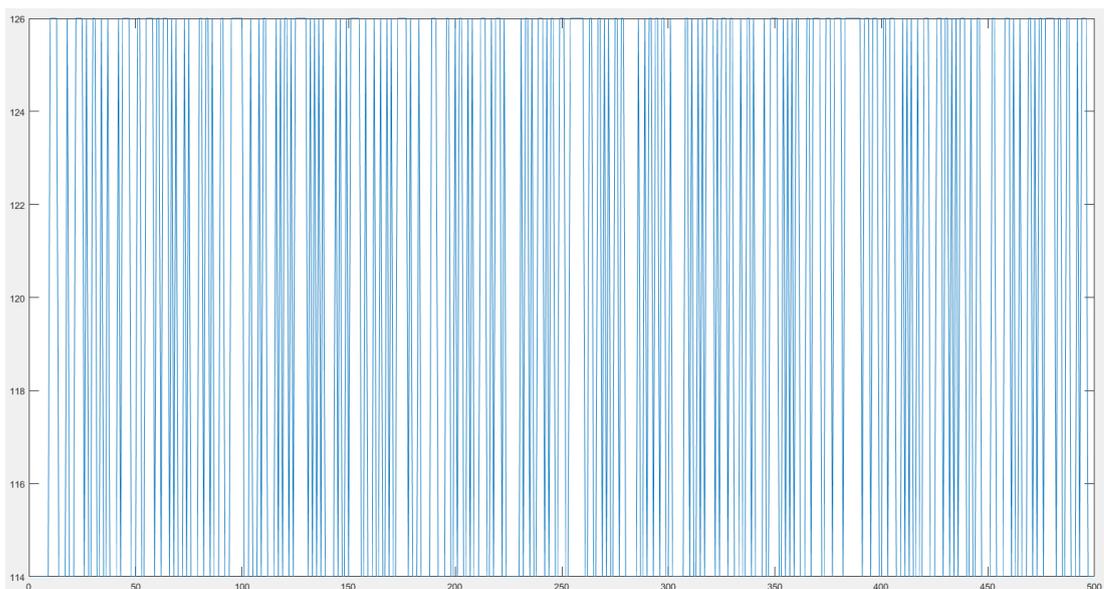


Figura 3. 35: Señal PRBS Servomotor X.

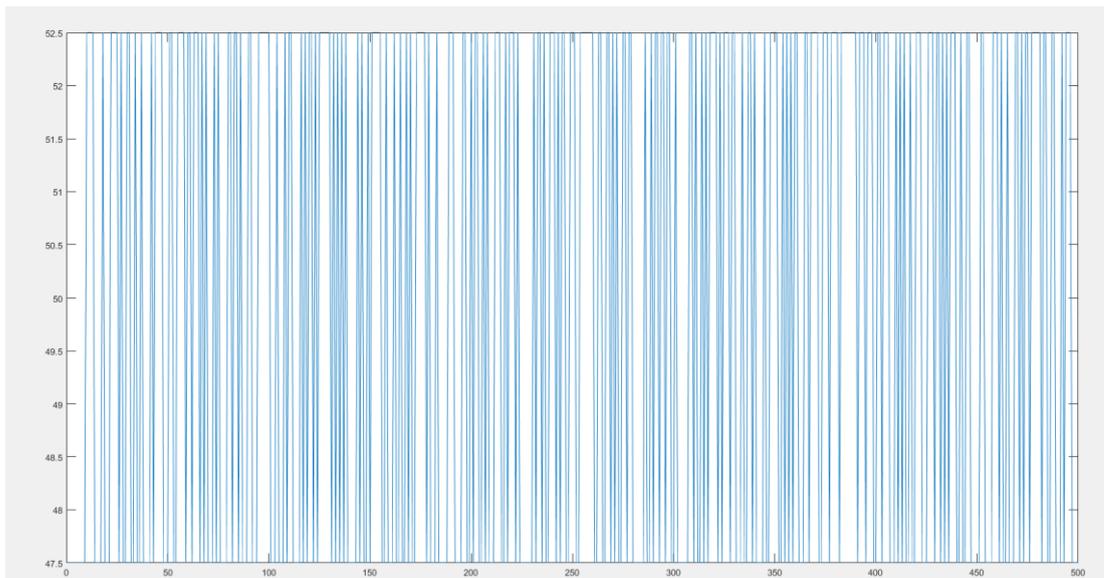


Figura 3. 36: Señal PRBS Servomotor Y.

La señal PRBS diseñada en Matlab se importa al Simulink, al realizar la identificación la señal PRBS se envía a la tarjeta Arduino DUE para la actuación de los servomotores. Se realiza el algoritmo de lectura y escritura dentro del entorno de Simulink. La identificación de la planta se realiza en lazo cerrado como se muestra en la figura 3.38 ya que es una planta inestable, aquello obliga a utilizar un control conocido y aplicar luego la señal PRBS antes descrita.

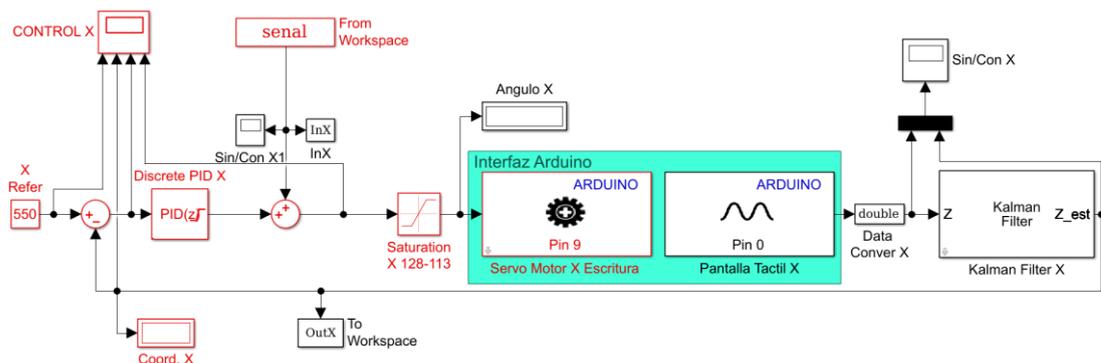


Figura 3. 37: Diagrama de bloques de eje X utilizando los datos del sensor.

Para la escritura de los valores de posición al servomotor en el eje X y en el eje Y se debe trabajar con el rango de 0 a 1023 Bits, que obliga a realizar una conversión de datos a la salida de la lectura de la pantalla táctil como se expone en la figura 3.38, ya que el valor que se obtiene está en el rango de operación de 0 a 254 bits.

Tal como se muestra en la figura 3.38 utilizamos un filtro Kalman para filtrar la señal aún luego de la conversión de la señal PWM a la señal analógica. El filtro Kalman desarrollado en el entorno de Simulink se utiliza calculando el estado de un sistema dinámico a partir de una serie de mediciones incompletas y o ruidosas.

Este bloque puede usar el estado estimado previamente para predecir el estado actual. También puede usar la medición actual y el estado predicho para estimar el valor del estado actual. Para este caso se utiliza una medida estimada de salida como se muestra en la siguiente figura 3.39.

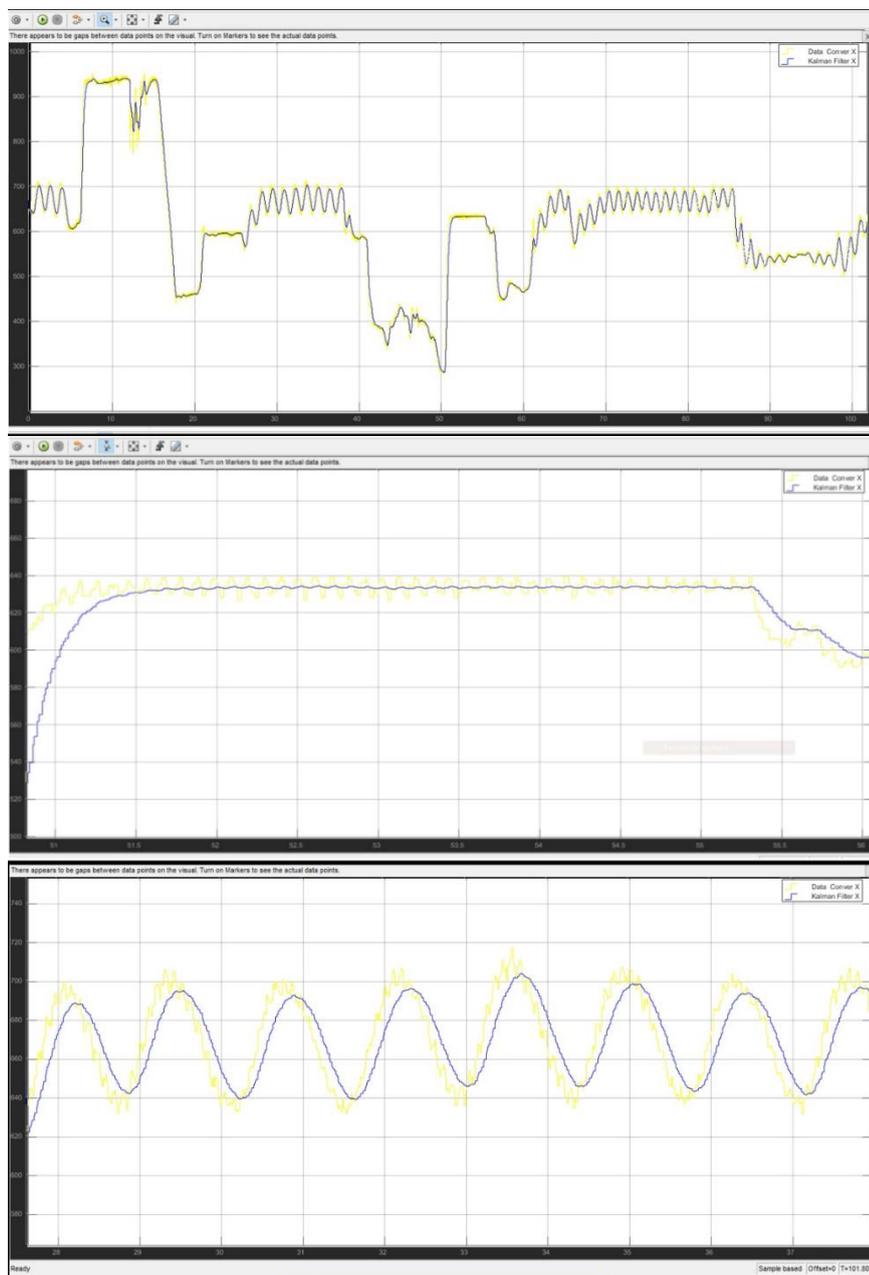


Figura 3. 38: Filtrado Kalman.

3.3.5 Identificación de la Planta en el eje X

Para la obtención de los controladores conocidos tanto para el eje X y el eje Y se utiliza el método científico de prueba y error estableciendo una hipótesis y haciendo ensayos de cómo responde cada atributo del PID.

En la Figura 3.40 que se presenta a continuación se observa los valores de PID del control conocido, obtenido al realizar el método científico de prueba y error.

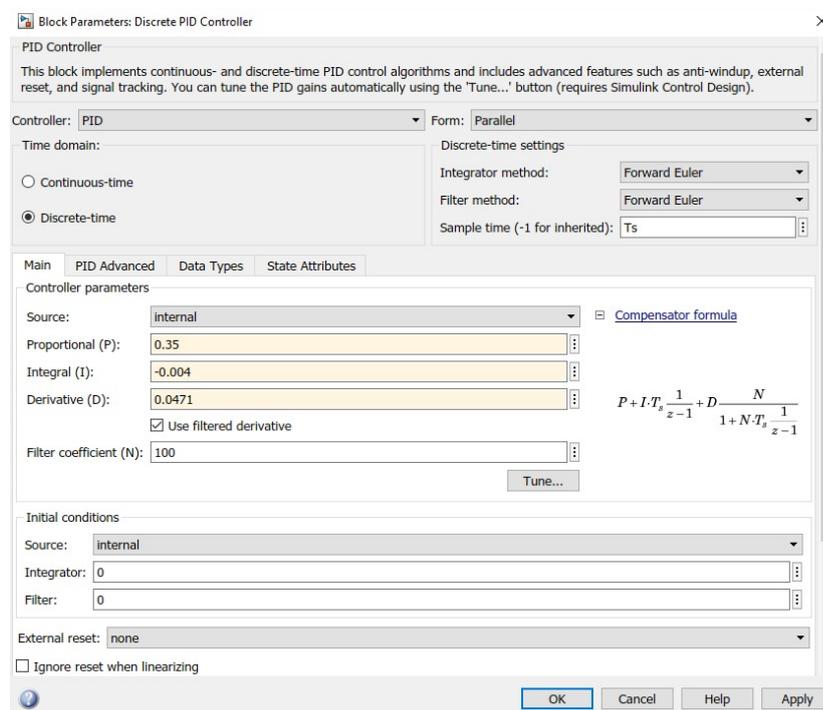


Figura 3. 39: Algoritmo de Control Conocido para el Eje X.

A continuación, se explica la función de transferencia en tiempo discreto del PID obtenido por el método científico de prueba y error utilizando el software Matlab.

P=0.35; %Proporcional

I=-0.004; %Integral

D=0.0471; %Derivativo

Ts=0.01; %Tiempo de Muestreo

KP=P-(P*I*Ts/2); % Equivalencias de constantes de sintonía continuas

KI=P*Ts*I; % a discretas

$KD=(P*D)/Ts;$

$pidz=tf([(KP+KI+KD) -(KP+2*KD) KD],[1 -1 0],Ts) \%PID\ discrete\ Forma\ posicional$

$pidz =$

$$\frac{1.998 z^2 - 3.647 z + 1.648}{z^2 - z}$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

Tal como se explica en la figura 3.38, se expone los datos de salida a través de la pantalla táctil, los mencionados datos son enviados al Workspace con los datos de entrada que se están obteniendo luego del control conocido, los valores de entrada y salida tienen como nombre InX y OutX respectivamente.

Con los valores obtenidos se realiza la identificación utilizando la herramienta del software Matlab llamado ident como se muestra en la siguiente figura 3.41.

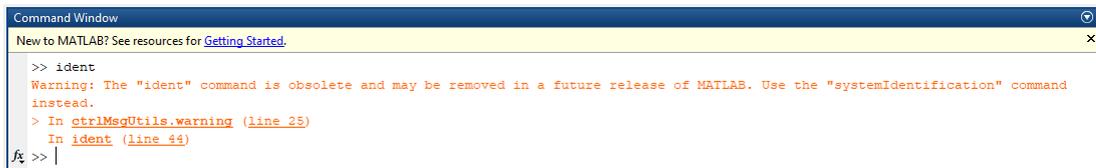


Figura 3. 40: Ident, sentencia escrita en el comando de Matlab.

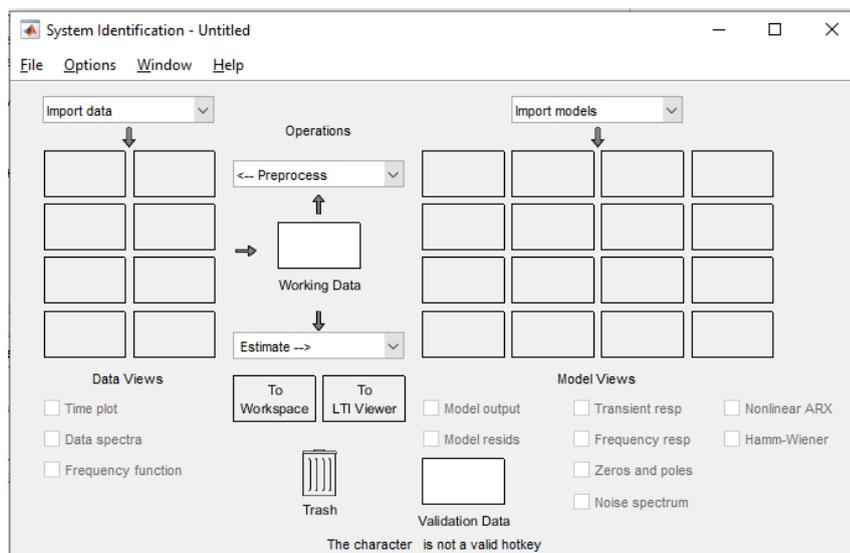


Figura 3. 41: Estructura del Toolbox Ident.

El Toolbox Ident como se observa en la figura 3.42 tiene como característica al momento de ingresar los datos escribirle el nombre de las variables de entrada y las variables de salida. La identificación se realiza en el dominio del tiempo como se muestra en la figura 3.43.

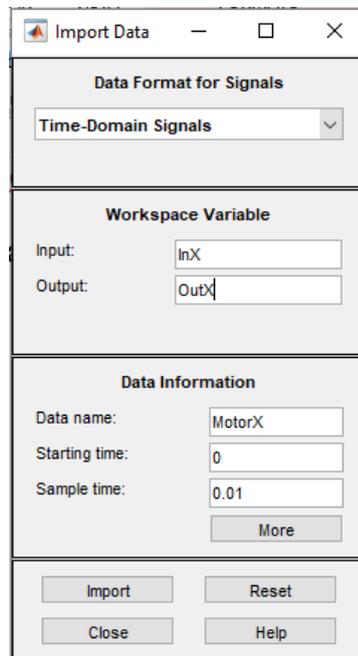


Figura 3. 42: Ingreso de datos en el Toolbox Ident en el eje X.

A continuación, se muestra la importación de los datos del Workspace y con ayuda de ident se realiza el proceso de la identificación del sistema SISO.

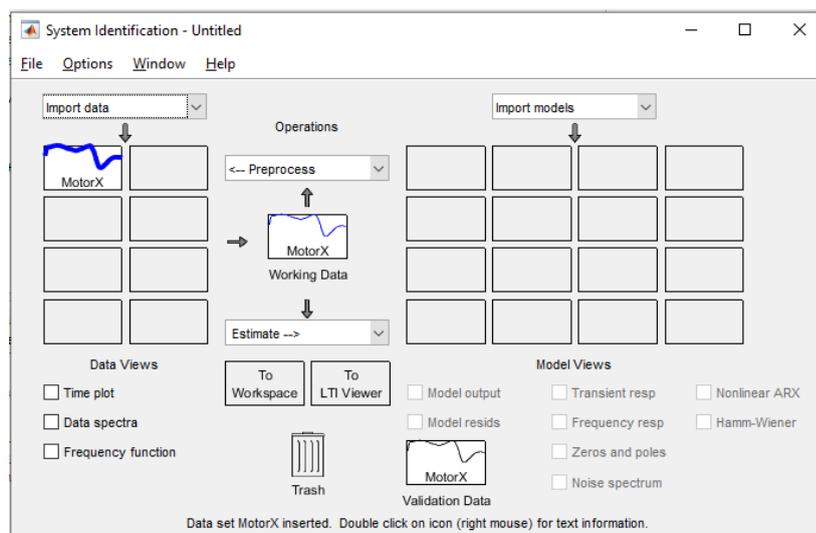


Figura 3. 43: Importación de datos-ident en el eje X.

Para un mejor procesamiento de la señal se seleccionan los datos para la identificación como se muestra en la figura 3.44, de esta manera se elige cierto rango de los datos importados anteriormente.

Se estable la opción de procesamiento de selección de rango.

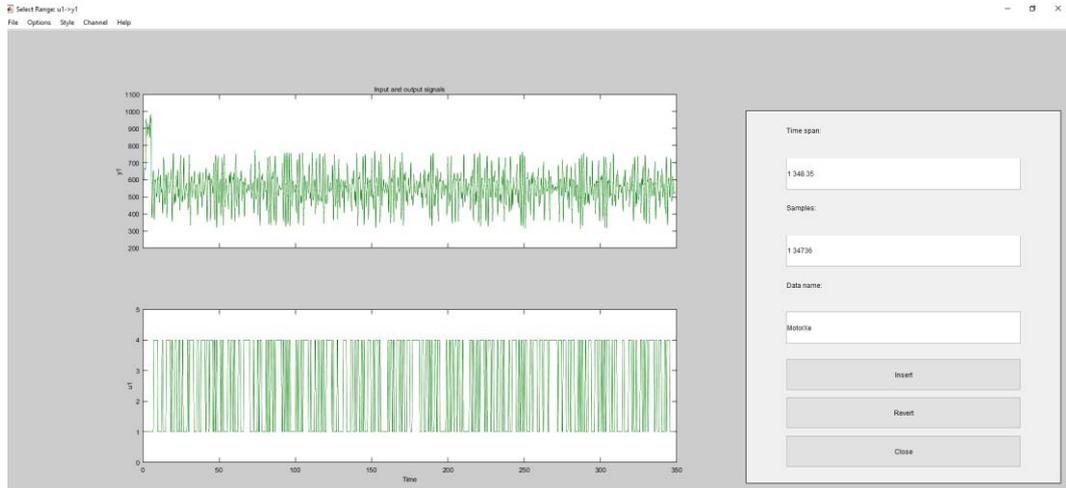


Figura 3. 44: Procesamiento de señal-Rango en eje X.

A continuación, se muestra el rango seleccionado para la identificación.

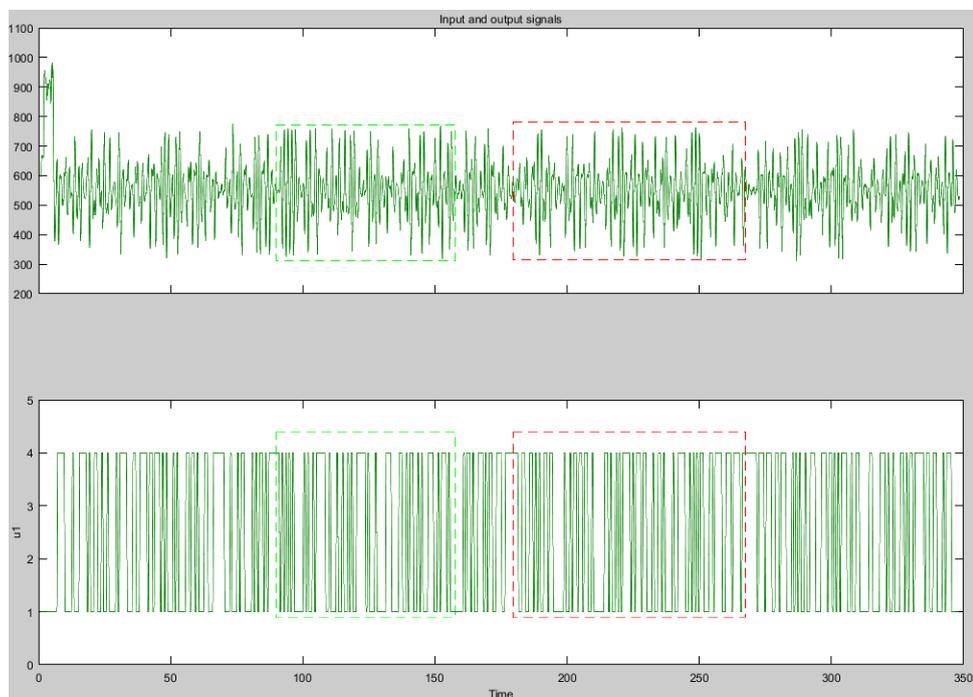


Figura 3. 45: Selección del rango de operación para la identificación de la señal.

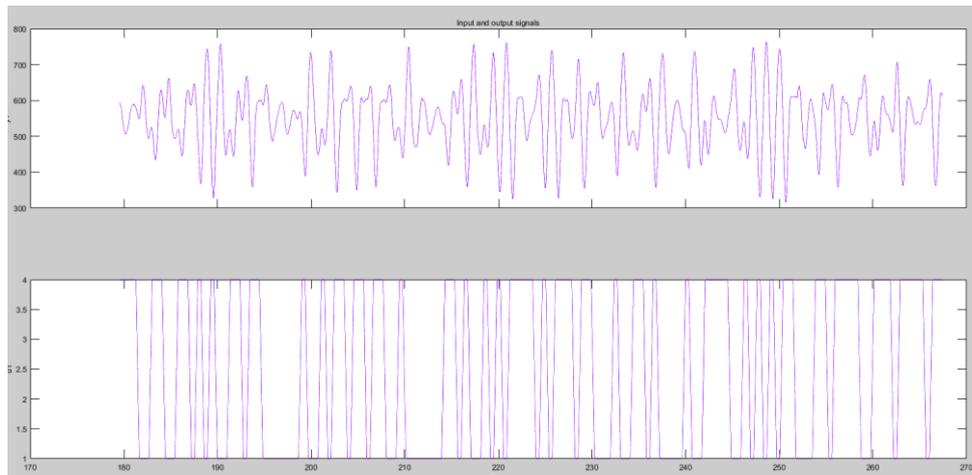


Figura 3. 46: Rango para realizar la identificación del servomotor X.

En la figura 3.46 se expone el rango de operación seleccionado para la identificación y diseño de la función de transferencia de la planta.

En la figura 3.48 que se describe a continuación se explica el procesamiento de la señal utilizando 2 polos y un cero.

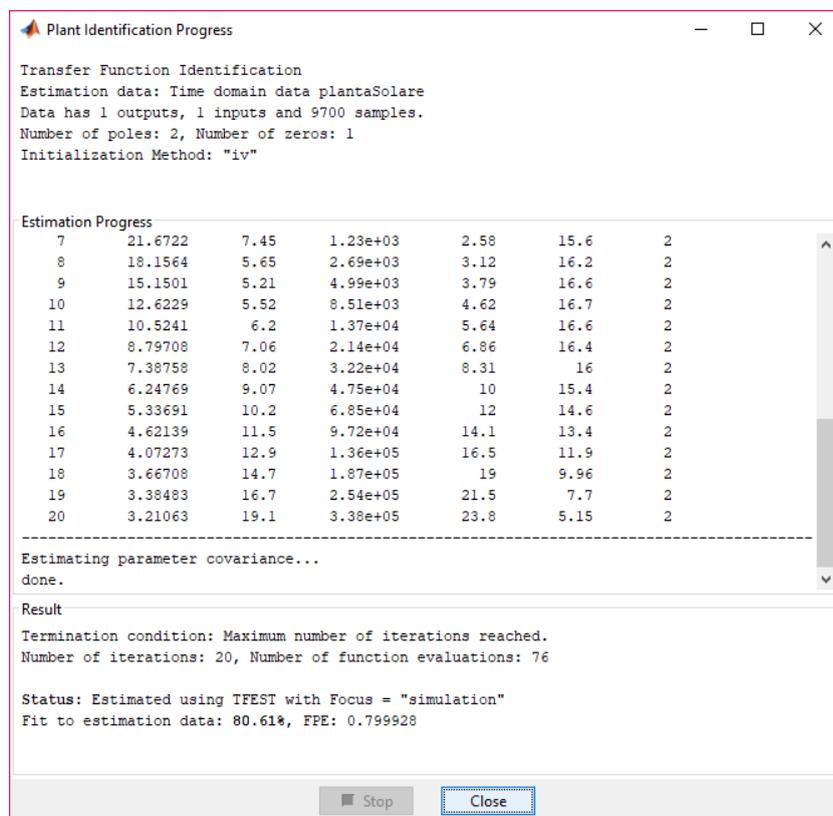


Figura 3. 47: Procesamiento de identificación de la planta utilizando ident.

Este paso se lo realiza hasta hallar el mejor porcentaje de estimación de la señal, obteniendo la función de transferencia estimada del sistema SISO en el eje X.

La figura 3.49, se evidencia que el procesamiento de la identificación toolbox ident y nos muestra las funciones de transferencia con sus respectivos porcentajes de error a los valores ingresados anteriormente.

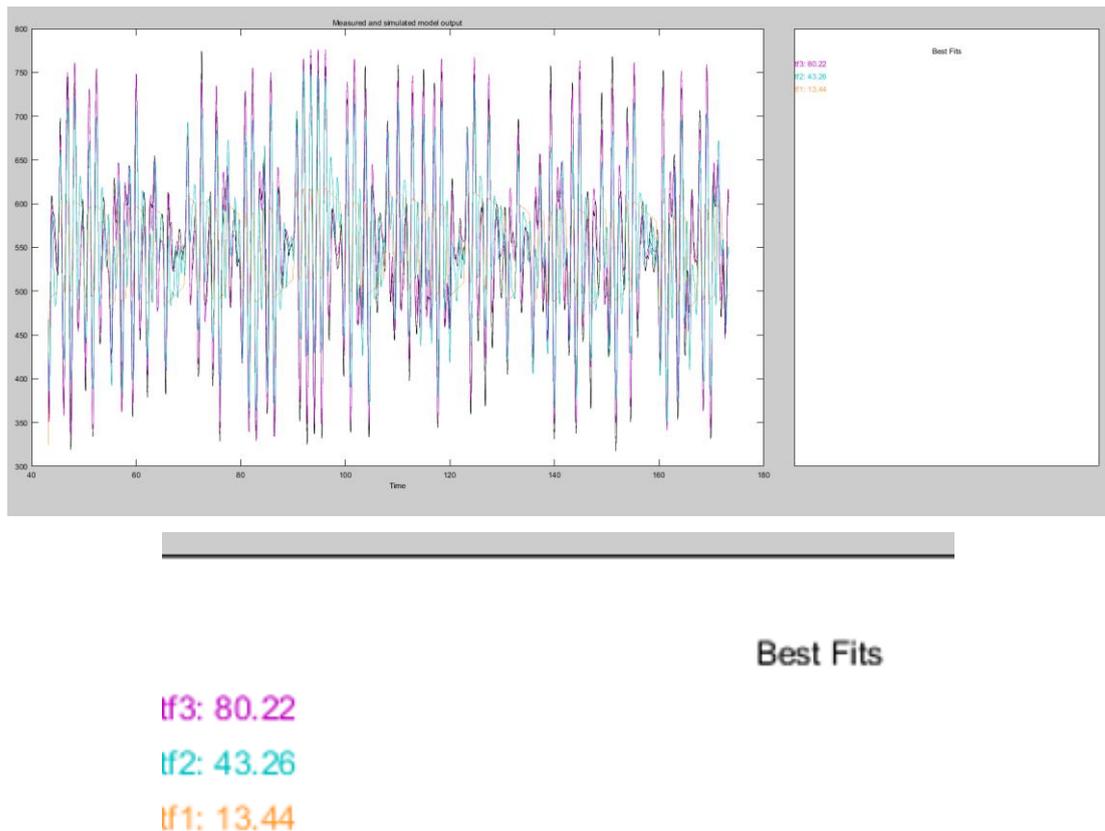


Figura 3. 48: Gráfico de identificación con su respectivo porcentaje de error.

Luego se escoge la función de transferencia con mejor porcentaje y se exporta al Workspace para la utilización de la misma, se realiza la debida transformación de tiempo continuo a discreto utilizando el software Matlab.

La función de transferencia que se utiliza es de 2 polos y 1 cero y tiene como nombre la variable tf3 y cuenta con un porcentaje de estimación de 80.22%.

tf3 =

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{1.966 s + 1.232}{s^2 + 16.11 s + 0.9911}$$

Name: tf3

Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:

Number of poles: 2 Number of zeros: 1

Number of free coefficients: 4

Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:

Estimated using TFEST on time domain data "MotorXv".

Fit to estimation data: 80.22% (stability enforced)

FPE: 0.942.7, MSE: 0.8342

3.3.6 Identificación de la Planta en el eje Y

De la misma forma como se identificó la planta en el eje X se lo realiza a continuación para el eje Y. Es necesario la obtención del control conocido el cual se muestra en la siguiente figura.

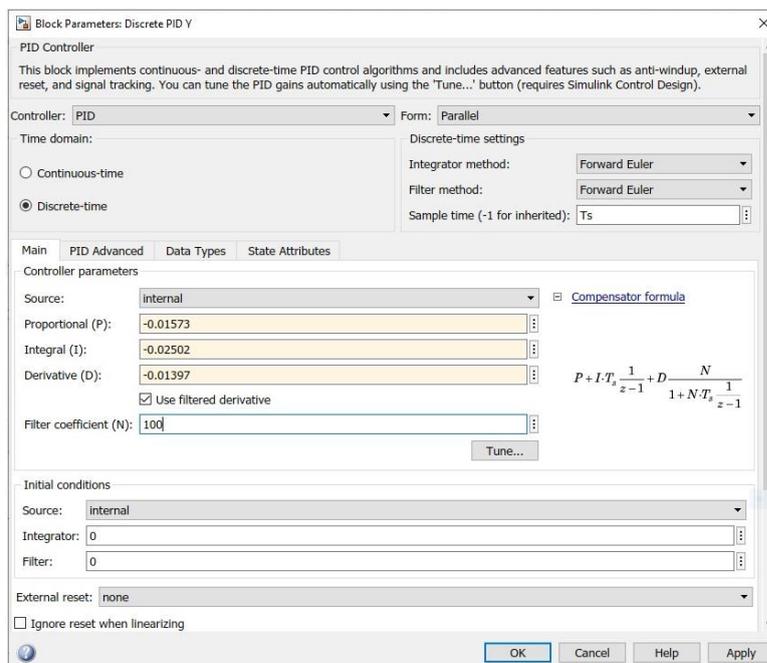


Figura 3. 49: Algoritmo del Control Conocido para el Eje Y.

Se expone la función de transferencia en tiempo discreto del PID obtenido por el método científico de prueba y error utilizando el software Matlab.

P=-0.01579; %Proporcional

I=-0.02502; %Integral

D=-0.01397; %Derivativo

Ts=0.01; %Tiempo de Muestreo

KP=P-(P*I*Ts/2); % Equivalencias de constantes de sintonía continuas

KI=P*Ts*I; % a discretas

KD=(P*D)/Ts;

pidz=tf([(KP+KI+KD) -(KP+2*KD) KD],[1 -1 0],Ts) %PID discreto Forma posicional

pidz =

$$0.006271 z^2 - 0.02833 z + 0.02206$$

$$z^2 - z$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

Como se explica en la figura 3.48 se obtienen los datos de salida a través de la pantalla táctil, dicho datos son enviados al Workspace con los datos de entrada que se están obteniendo luego de los controles conocidos, los valores de entrada y salida tiene como nombre InY y OutY respectivamente.

Con los valores obtenidos se efectúa el reconocimiento utilizando la herramienta de identificación del software Matlab llamado ident como se obtiene en la figura 3.50

El Toolbox Ident que muestra la figura 3.51 tiene como característica que, al momento de ingresar los datos se debe escribir el nombre de las variables de entradas estos datos son ingresado en el dominio del tiempo.

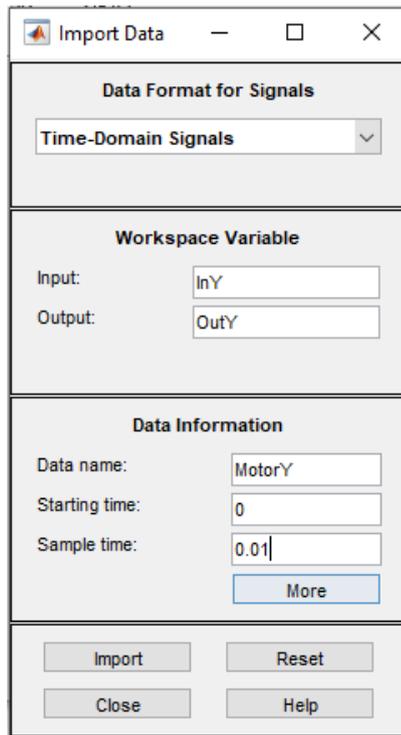


Figura 3. 50: Ingreso de datos en el Toolbox Ident en el eje Y.

De esta forma continua la identificación de la planta, se importan los datos del Workspace y con la ayuda de Ident se realiza el proceso de la identificación de la planta como se muestra en la figura 3.52.

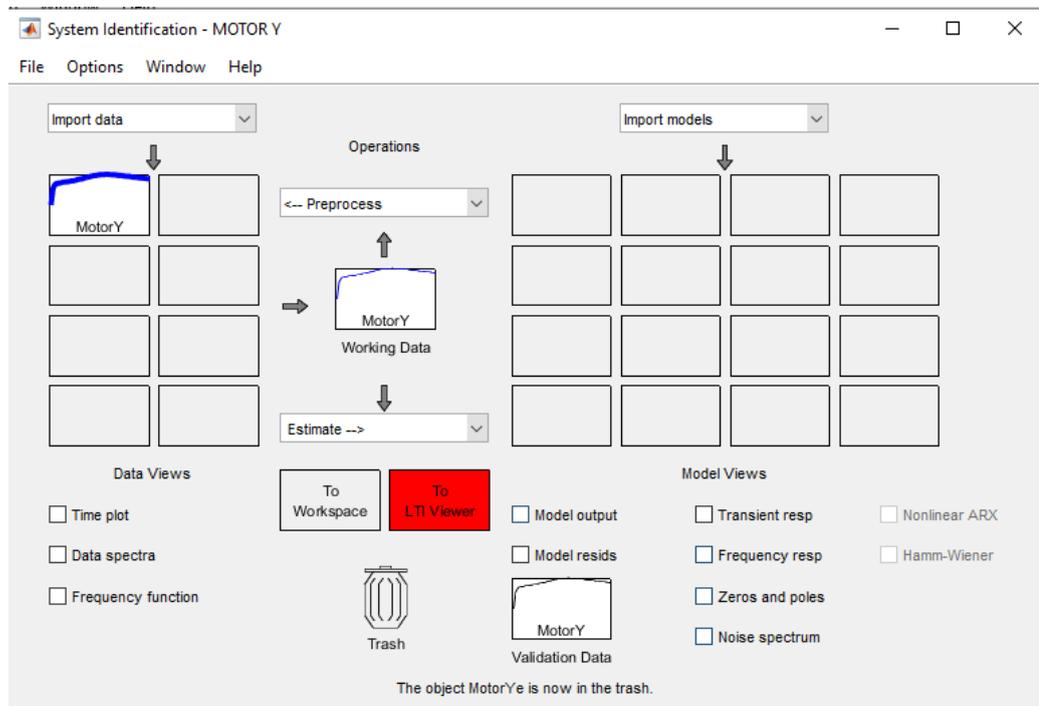


Figura 3. 51: Importación de datos-ident.

Para un mejor procesamiento de la señal se seleccionan los datos para el reconocimiento, de este modo se escoge cierto rango de los datos importados anteriormente.

Por lo cual, se define la opción de procesamiento de selección de rango como se observa en la figura 3.52

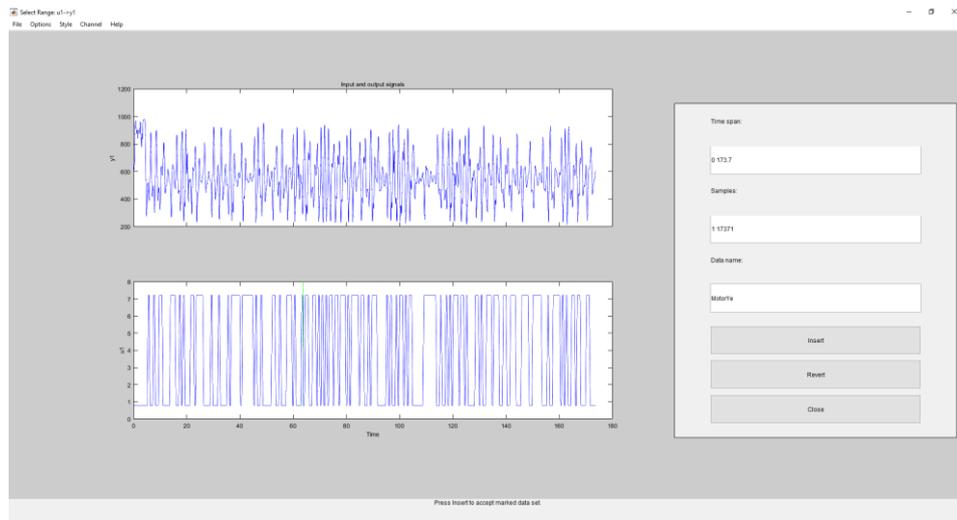


Figura 3. 52: Procesamiento de señal-Rango.

A continuación, se expone el rango seleccionado para la identificación.

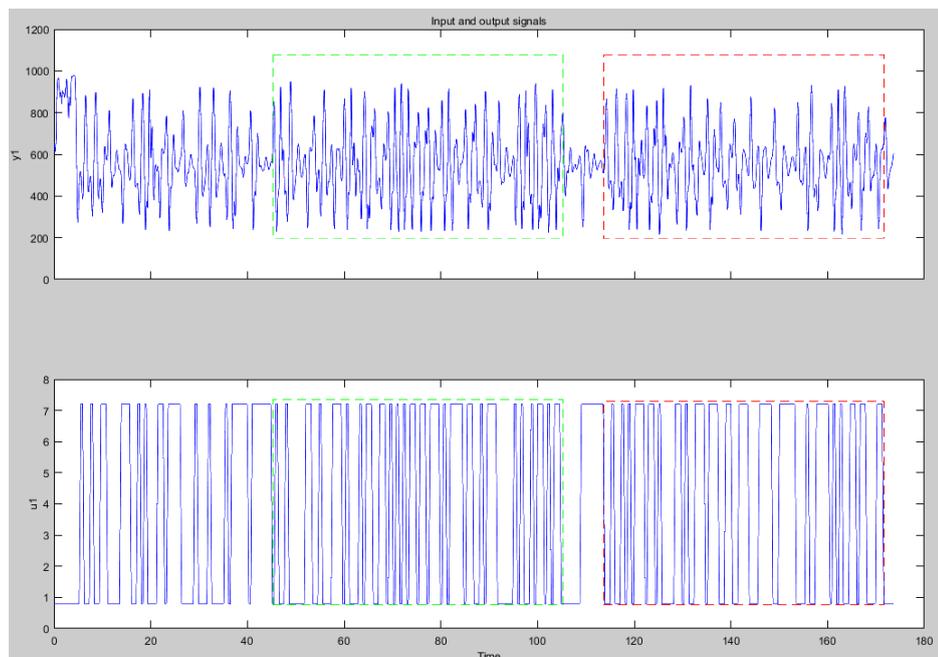


Figura 3. 53: Rango de operación para la identificación de la señal.

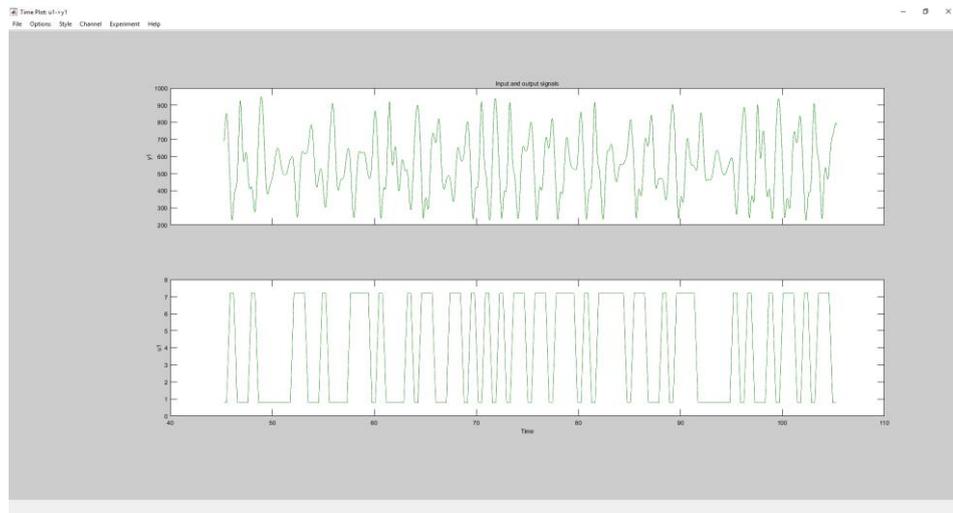


Figura 3. 54: Rango seleccionado para la identificación del servomotor Y.

En la figura 3.55 explica el rango de operación seleccionado para la identificación y diseño de la función de transferencia de la planta.

En la figura 3.56 que se expone a continuación, se ubica el procesamiento de la señal utilizando 2 polos y un cero.

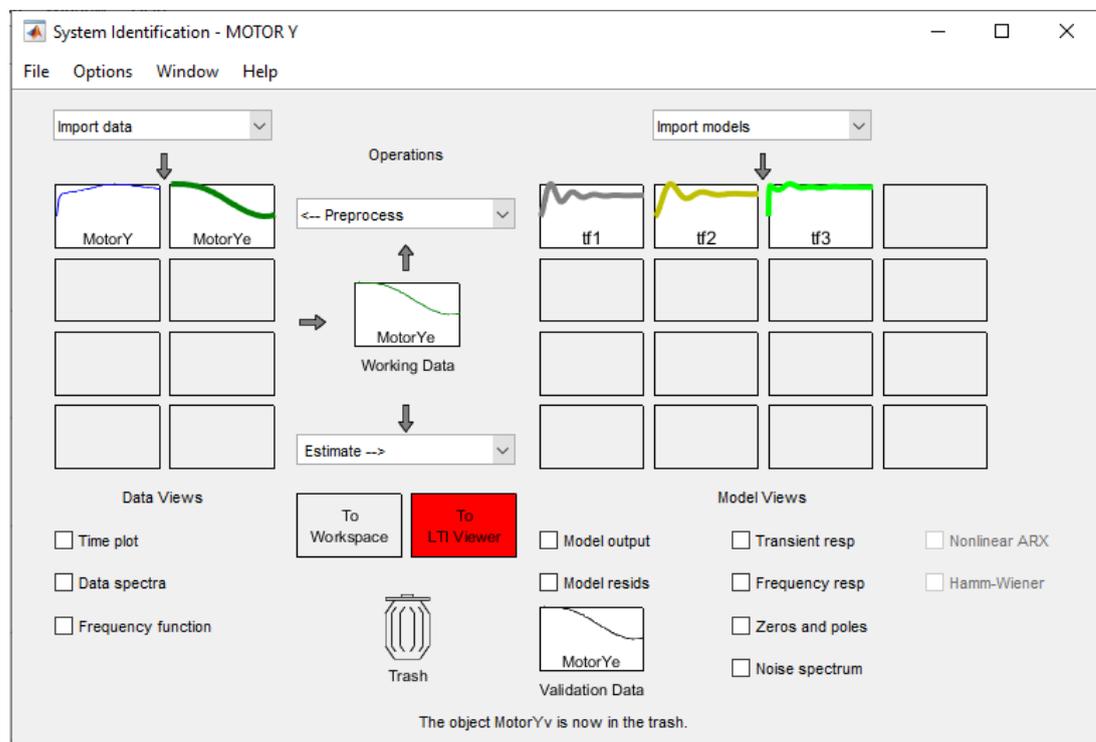


Figura 3. 55: Procesamiento de la identificación de la planta en el eje Y.

Este paso se realiza hasta hallar el mejor porcentaje de estimación de la señal obteniendo la función de transferencia estimada de la planta.

El procesamiento permite identificar las siguientes funciones de transferencia con sus respectivos porcentajes de error a los valores ingresados anteriormente.

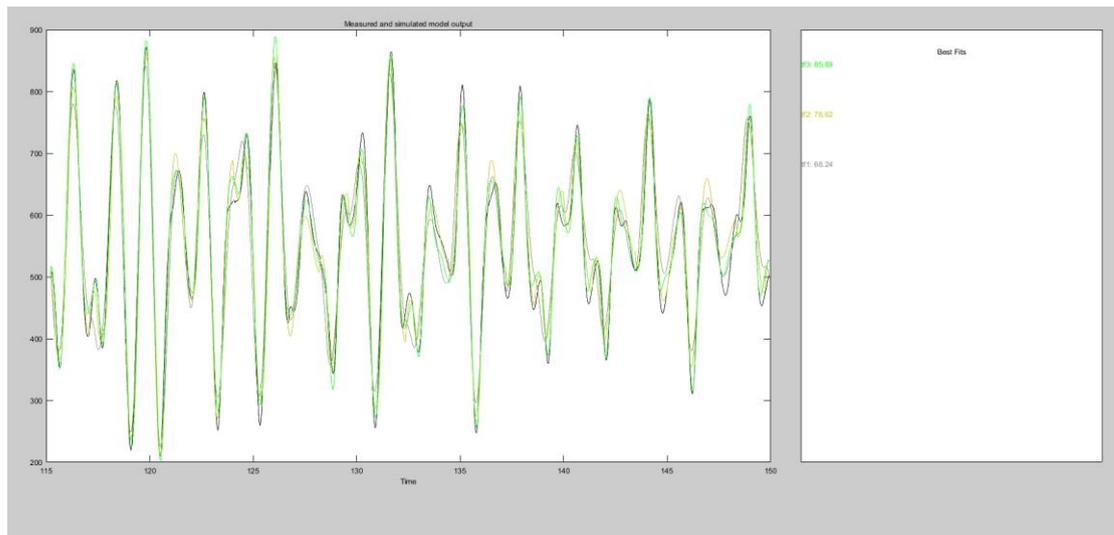


Figura 3. 56: Identificación con su respectivo porcentaje de error para el eje Y.

Luego se selecciona la función de transferencia con mejor porcentaje y se exporta al Workspace para la utilización de esta, se realiza la debida transformación de tiempo continuo a discreto utilizando Matlab.

La función de transferencia que se selecciona es de 2 polos y 1 cero y tiene el nombre la variable tf3, la misma que tiene un porcentaje de estimación de 85.69%.

tf3 =

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{1.742 s + 2.942}{s^2 + 20.11 s + 2.991}$$

Name: tf3

Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:

Number of poles: 2 Number of zeros: 1

Number of free coefficients: 4

Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:

Estimated using TFEST on time domain data "MotorYv".

Fit to estimation data: 85.69% (stability enforced)

FPE: 0.8116.3, MSE: 0.6272

Con ayuda de Simulink se evalúa las funciones de transferencia obtenida en lazo cerrado para obtención del algoritmo PID para el eje X y el eje Y.

3.4 Diseño del Algoritmo PID

Para realizar el diseño del algoritmo PID es fundamental definir en qué tiempo se efectúa el control, para ello, la identificación fue obtenida con un $T_s=0.01$, partiendo de eso se diseña el control en tiempo discreto.

La función de transferencia de los sistemas SISO se transforma de tiempo continuo a tiempo discreto con ayuda del Software Matlab. Para diseño del algoritmo PID se muestra a continuación la figura 3.58.

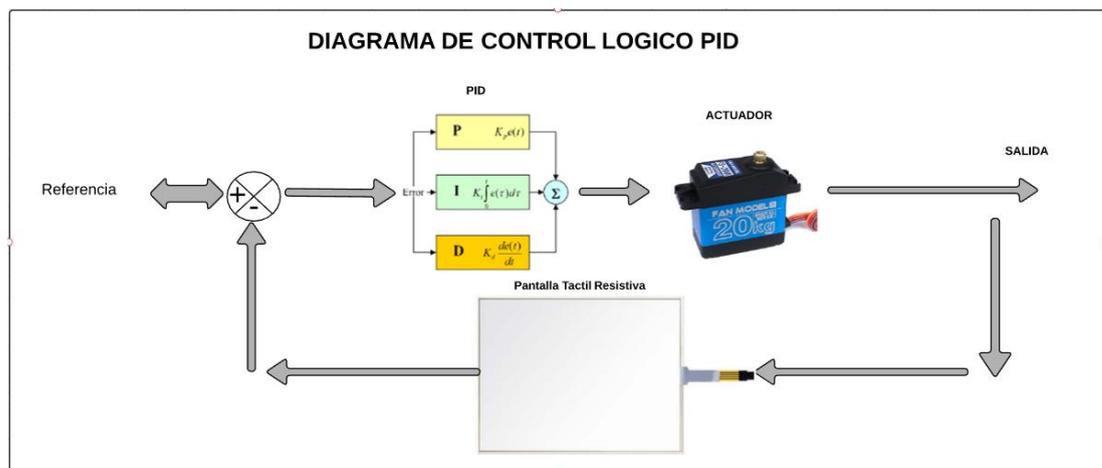


Figura 3. 57: Diagrama de control lógico PID en la plataforma inercial de 2-GDL.

3.4.1 Diseño del Algoritmo PID en el eje X

- Transformación de Continuo a Discreto

Con ayuda del software Matlab se realiza la transformación

```
%MOTOR X  
numX=[1.966 1.232];  
denX=[1 16.11 0.9911];  
tfX=tf(numX,denX);  
step(tfX)  
G_sx=tf(numX,denX)  
G_zx=c2d(G_sx,0.01)
```

Se muestra el resultado obtenido en la figura 3.59.

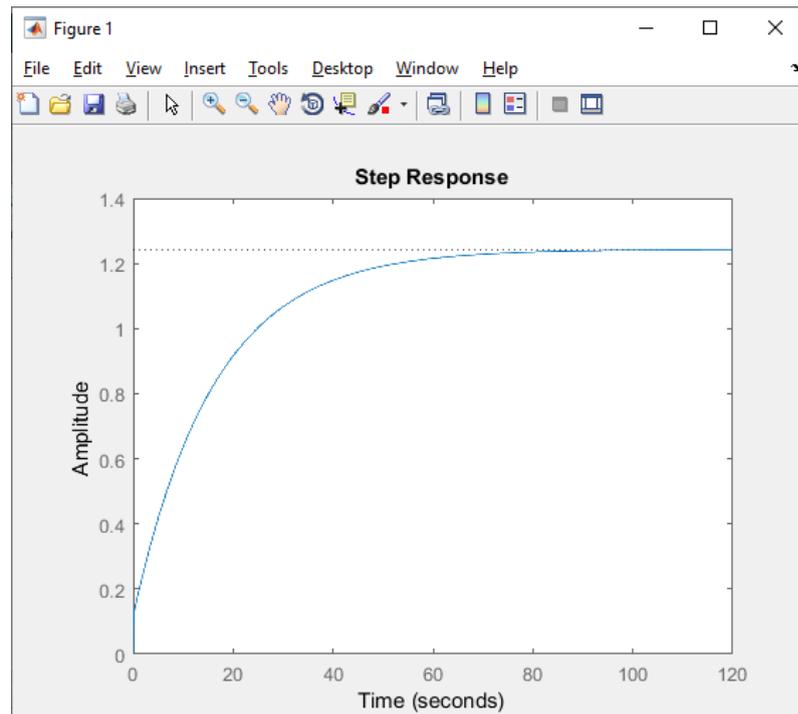


Figura 3. 58: Respuesta a una señal escalón del eje X.

Función de transferencia en tiempo discreto.

$G_{zx} =$

$$\frac{0.01822z - 0.0181}{z^2 - 1.851z + 0.8512}$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

- Determinación de los parámetros de PID usando el modelo de la planta del eje X en Simulink.

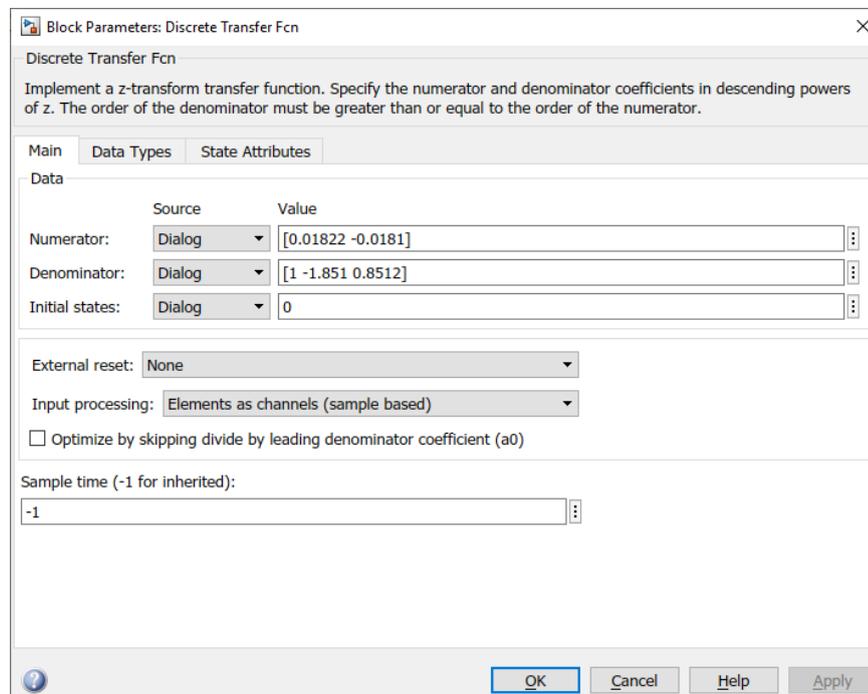


Figura 3. 59: Valores de la función de transferencia.

Se realiza el diseño de la planta del eje X para la obtención de los parámetros K_p , K_i y K_d , el diagrama es en lazo cerrado como se muestra en la figura 3.61.

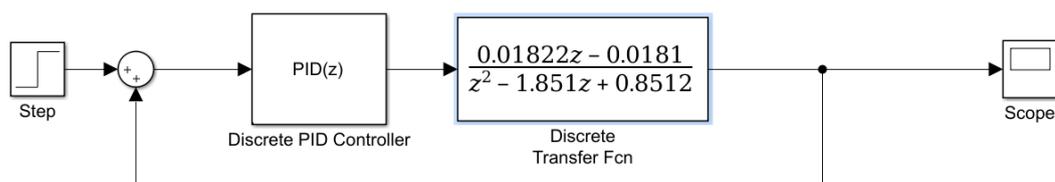


Figura 3. 60: Planta del Eje X en Simulink.

Utilizando el Toolbox PID tuner se obtiene el parámetro constante de PID para que trabaje de tal forma como se espera que la planta responda en el eje X.

En la siguiente figura se describe la respuesta sin modificar los valores de constante K_p , K_i , K_d en un tiempo de 10.0 segundo de ejecución de la planta del eje de las X.

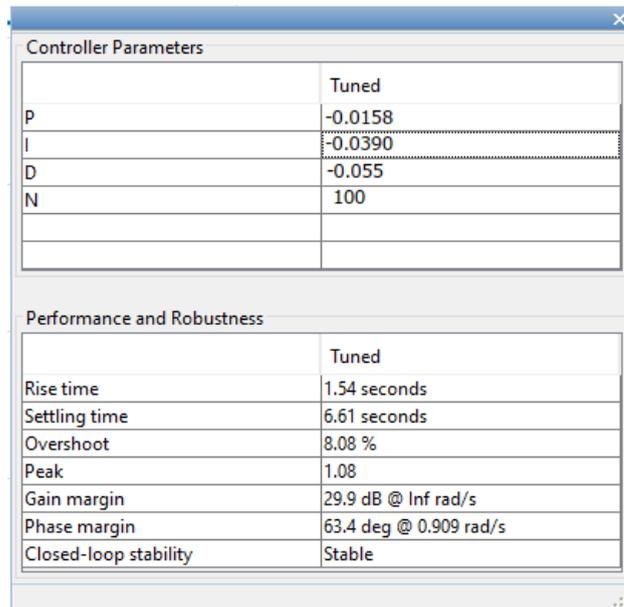


Figura 3. 61: Constantes de PID eje de las X.

Con la ayuda del Toolbox para encontrar el PID se hallan los datos que se describen en la figura 3.62.

Los parámetros ubicados presentan la respuesta a la función escalón de la función de transferencia como se indica en la figura 3.63.

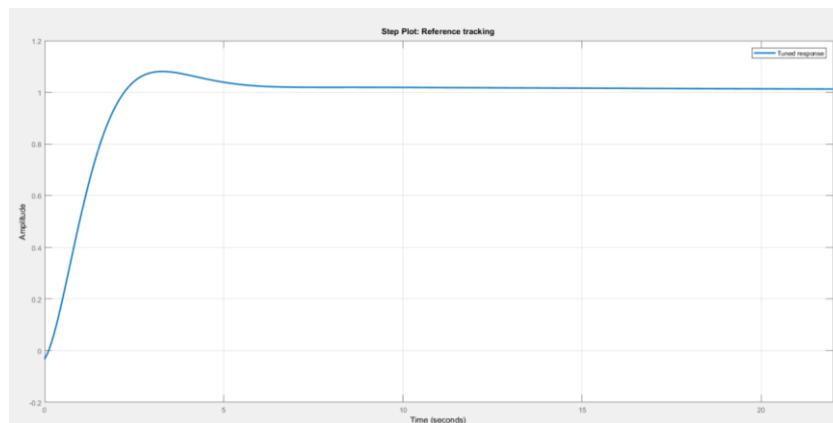


Figura 3. 62: Respuesta al escalando en lazo cerrado para el eje X.

Con la obtención de los parámetros de Kp, Ki y Kd del PID del eje de las X en lazo cerrado se procede a la evaluación de dichos parámetros en la plataforma inercial de 2-GDL.

Se realiza el diseño del algoritmo de la planta de 2 GDL en el Simulink considerando las entradas y salidas antes mencionadas. Para el desarrollo de la misma se emplea el diseño de la figura 3.38 que se realizó las siguientes modificaciones que se describen en la figura 3.64.

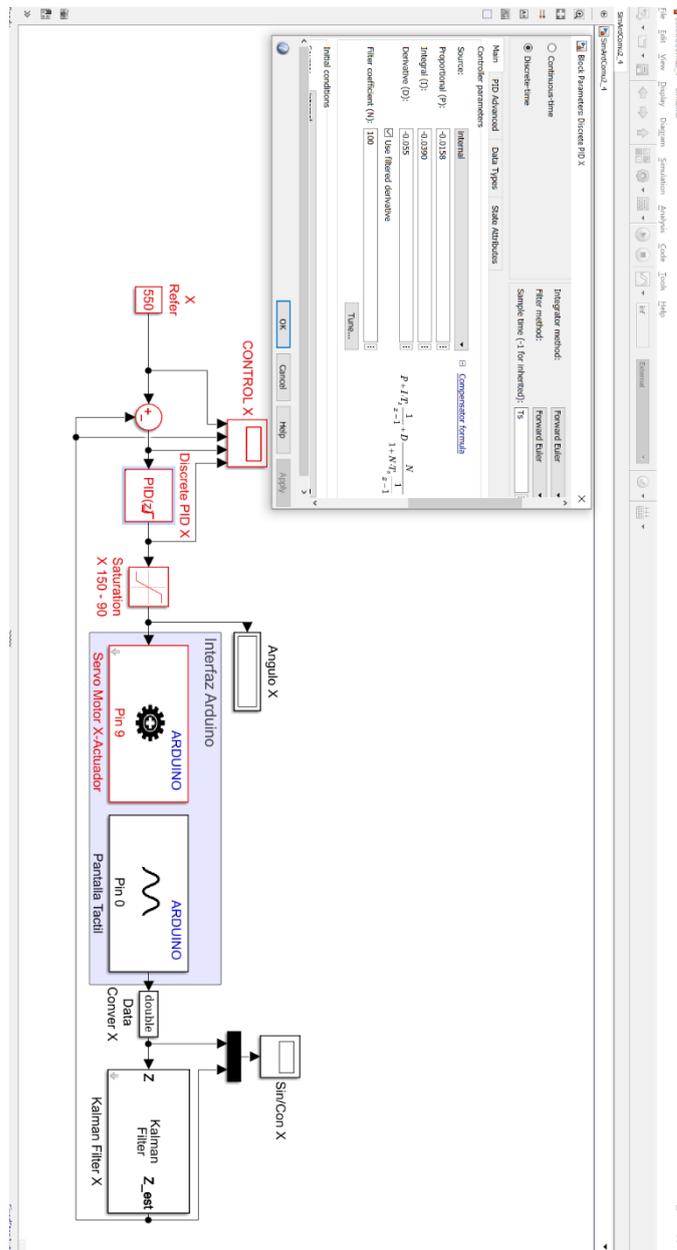


Figura 3. 63: Bloques para el eje de X, con el algoritmo de control PID.

Al realizar las pruebas con la planta real se realizó ajustes en los valores PID los cuales se muestra a continuación en la figura 3.65.

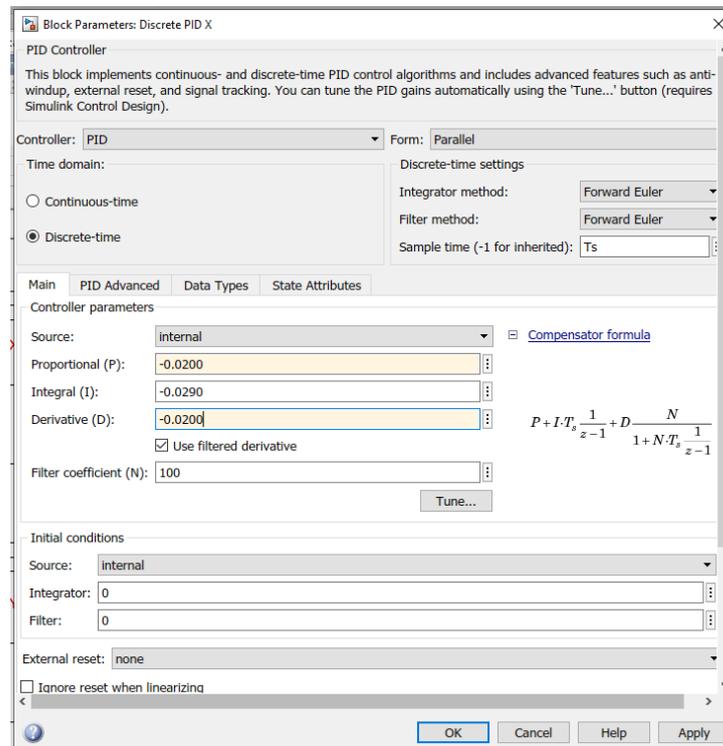


Figura 3. 64: Parámetros de control PID en tiempo Real para el eje de las X.

Con la ayuda de Matlab, se muestra a continuación la función de transferencia en tiempo discreto del controlador PID de la plataforma inercial de 2-GDL en tiempo real del eje de las X

PID discreto en forma posicional.

pidz =

$$\frac{0.02 z^2 - 0.06 z + 0.04}{z^2 - z}$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

En la figura 3.66 se muestra el algoritmo de control PID en el eje de las X.

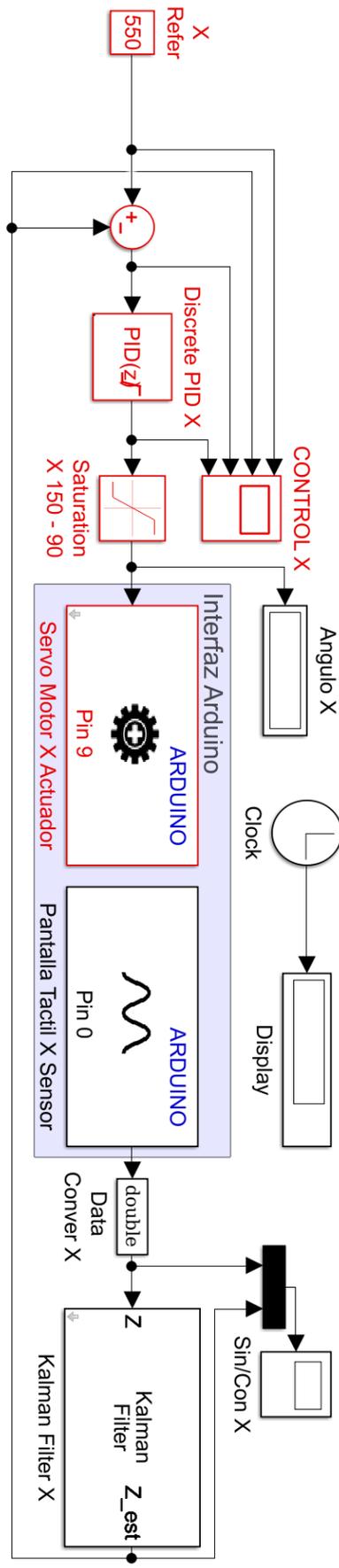


Figura 3. 65: Diseño del Algoritmo PID en el eje X.

3.4.2 Diseño del Algoritmo PID en el eje Y

- Transformación de tiempo continuo a discreto de la función de transferencia del sistema SISO del eje Y.

Con ayuda del software Matlab se realiza la transformación

```
%MOTOR Y  
numY=[1.742 2.942];  
denY=[1 20.11 2.9911];  
tfY=tf(numY,denY);  
step(tfY)  
G_sy=tf(numY,denY)  
G_zy=c2d(G_sy,0.01)
```

Resultado obtenido a la transformación se muestra en la figura 3.67

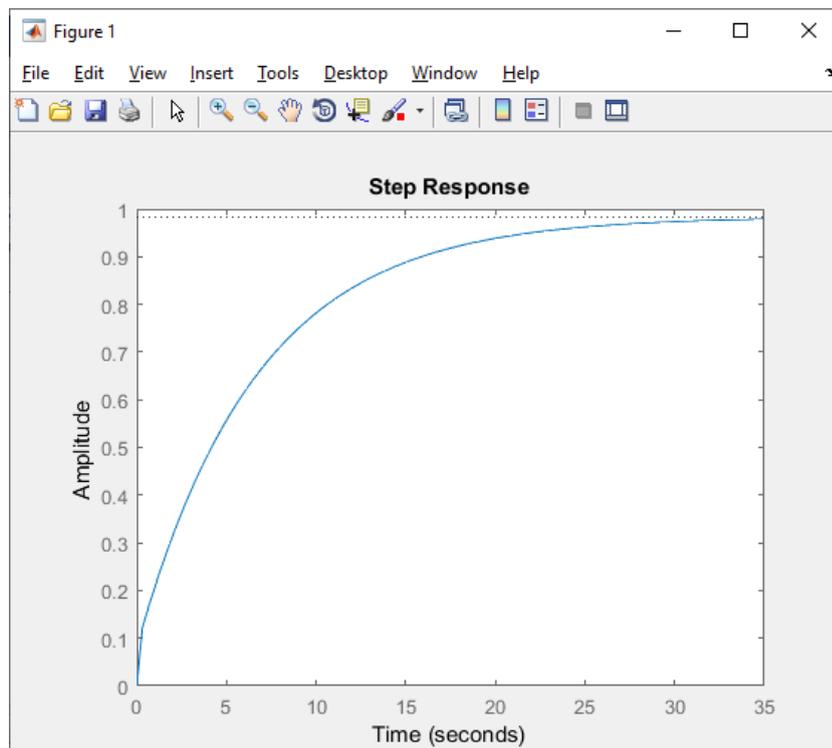


Figura 3. 66:Respuesta a una señal escalón para el eje Y.

Función de transferencia en tiempo discreto.

$G_{zy} =$

$$\frac{0.01592z - 0.01565}{z^2 - 1.818z + 0.8178}$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

Se realiza el diseño de la planta del eje Y para la obtención de los parámetros K_p , K_i y K_d , el diagrama es en lazo cerrado como se muestra en la figura 3.68.

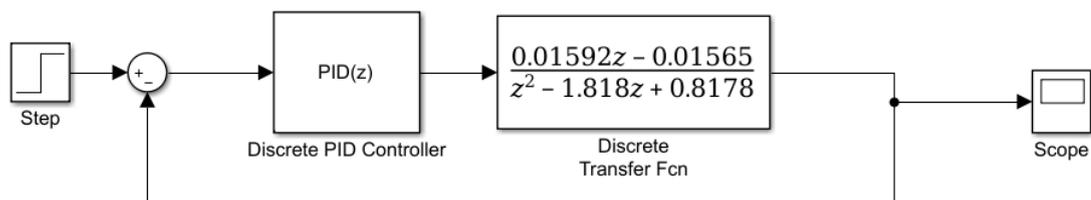


Figura 3. 67: Planta del Eje Y en Simulink.

Utilizando el Toolbox PID tuner se obtiene los parámetros constantes de PID para que trabaje de tal forma como se espera que la planta responda en el eje Y. En la siguiente figura se describe la respuesta sin modificar los valores de constante K_p , K_i , K_d en un tiempo de 10.0 segundo de ejecución de la planta del eje de las Y

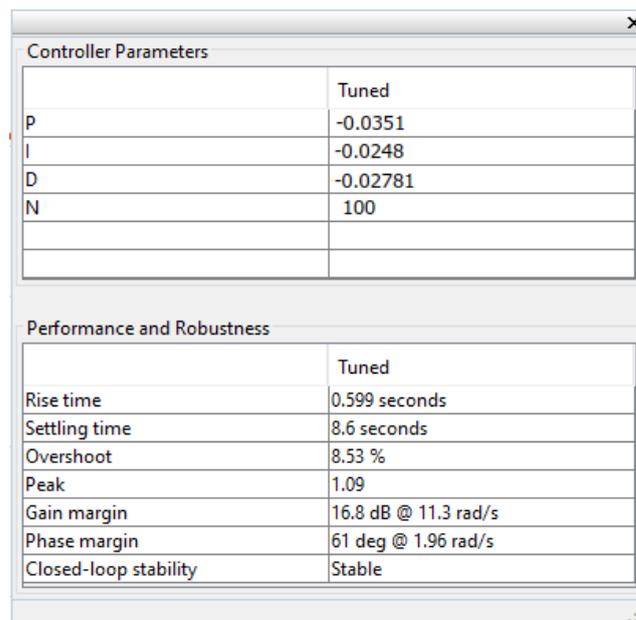


Figura 3. 68: Constantes de PID eje de las Y.

Con la ayuda del Toolbox para encontrar el PID se hallan los datos que se describen en la figura 3.69.

Los parámetros ubicados presentan la respuesta a la función escalón de la función de transferencia como se indica en la figura 3.70.

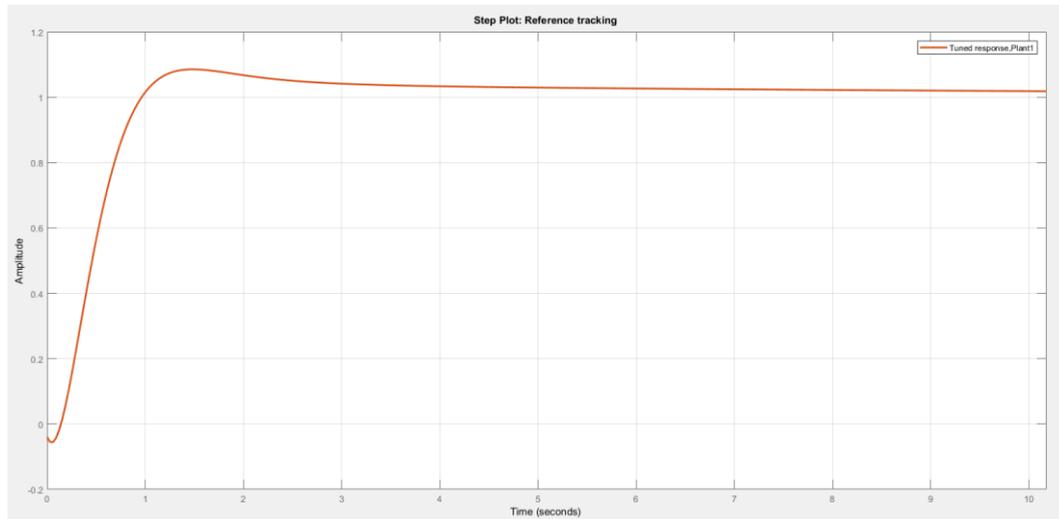


Figura 3. 69: Respuesta al escalón en circuito de lazo cerrado para el eje X.

Con la obtención de los parámetros de K_p , K_i y K_d del PID del eje de las Y en lazo cerrado se procede a la evaluación de dichos parámetros en la plataforma inercial de 2-GDL.

Se realiza el diseño del algoritmo de la planta de 2-GDL en el Simulink considerando las entradas y salidas antes mencionadas. Para el desarrollo de la misma se emplea el diseño de la figura 3.38 donde se muestran las siguientes modificaciones para el eje de las Y que se presentan en la figura 3.71.

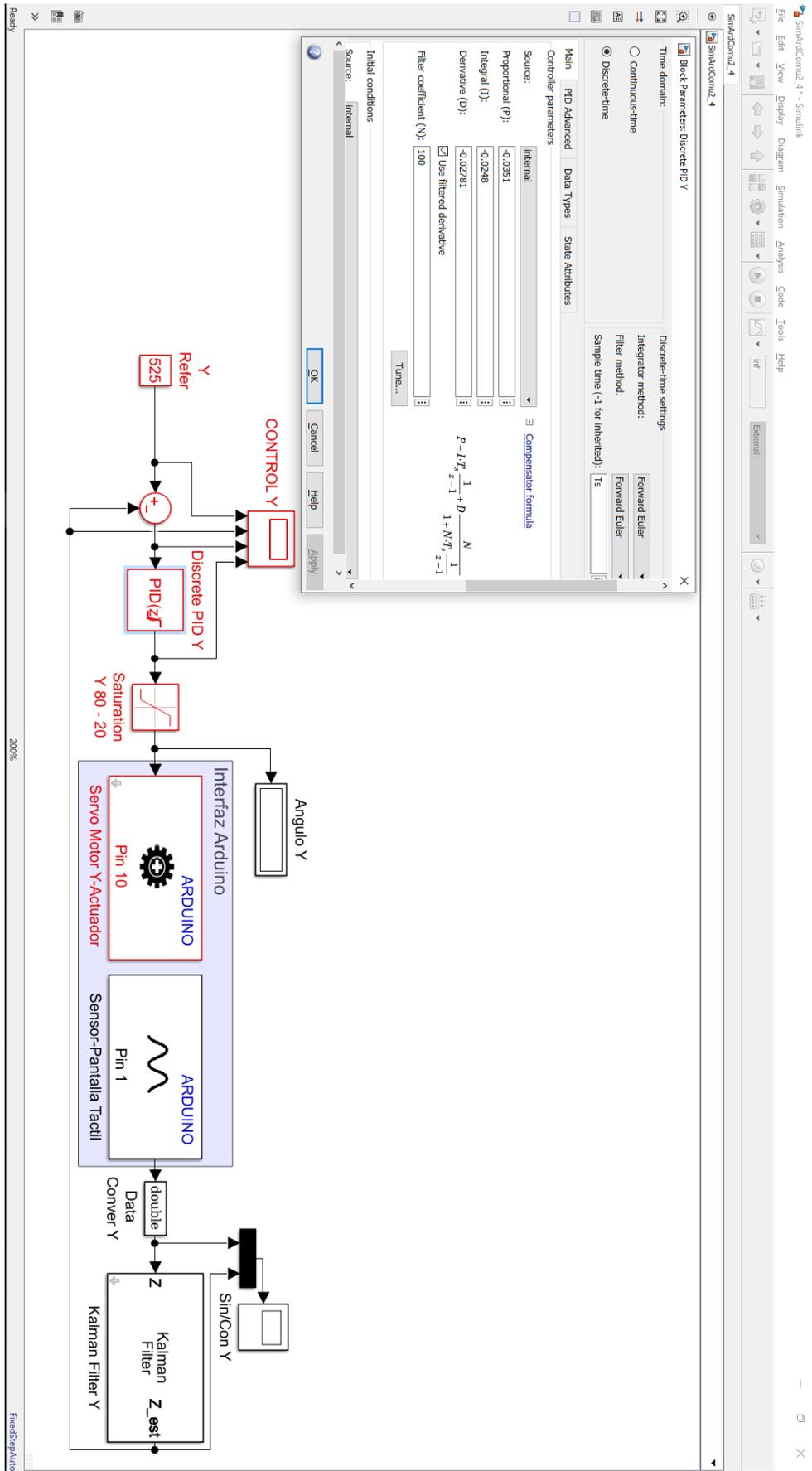


Figura 3. 70 Algoritmo de control PID para el eje Y.

Al realizar las pruebas con la planta real se realiza ajustes en los valores PID los cuales se describen a continuación.

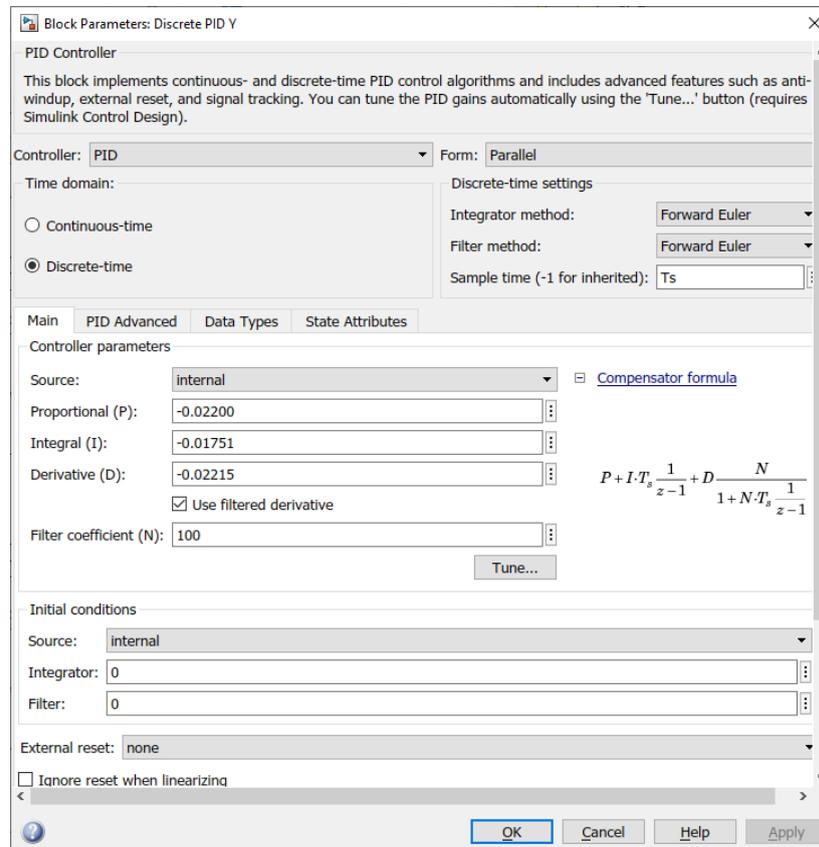


Figura 3. 71: Parámetros de control PID en tiempo Real para el eje Y.

Con la ayuda de Matlab se muestra la función de transferencia en tiempo discreto del controlador PID de la plataforma inercial de 2-GDL.

PID discreto en forma posicional.

pidz =

$$\frac{0.02673 z^2 - 0.07546 z + 0.04873}{z^2 - z}$$

Sample time: 0.01 seconds

Discrete-time transfer function.

En la figura 3.73 se muestra el algoritmo de control PID en el eje de las Y

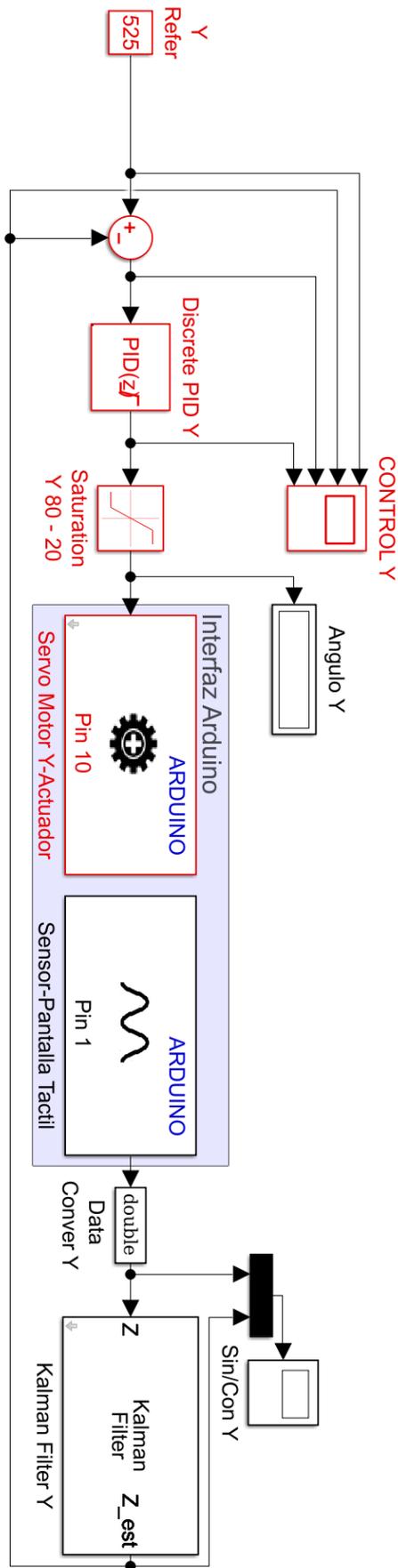


Figura 3. 72: Diseño del Algoritmo PID en el eje Y.

Diseño del algoritmo de control PID tanto para el eje X y para el eje Y se presenta el diagrama de bloques del sistema de control automático de la plataforma inercial de 2-GDL que se expone en la figura 3.74.

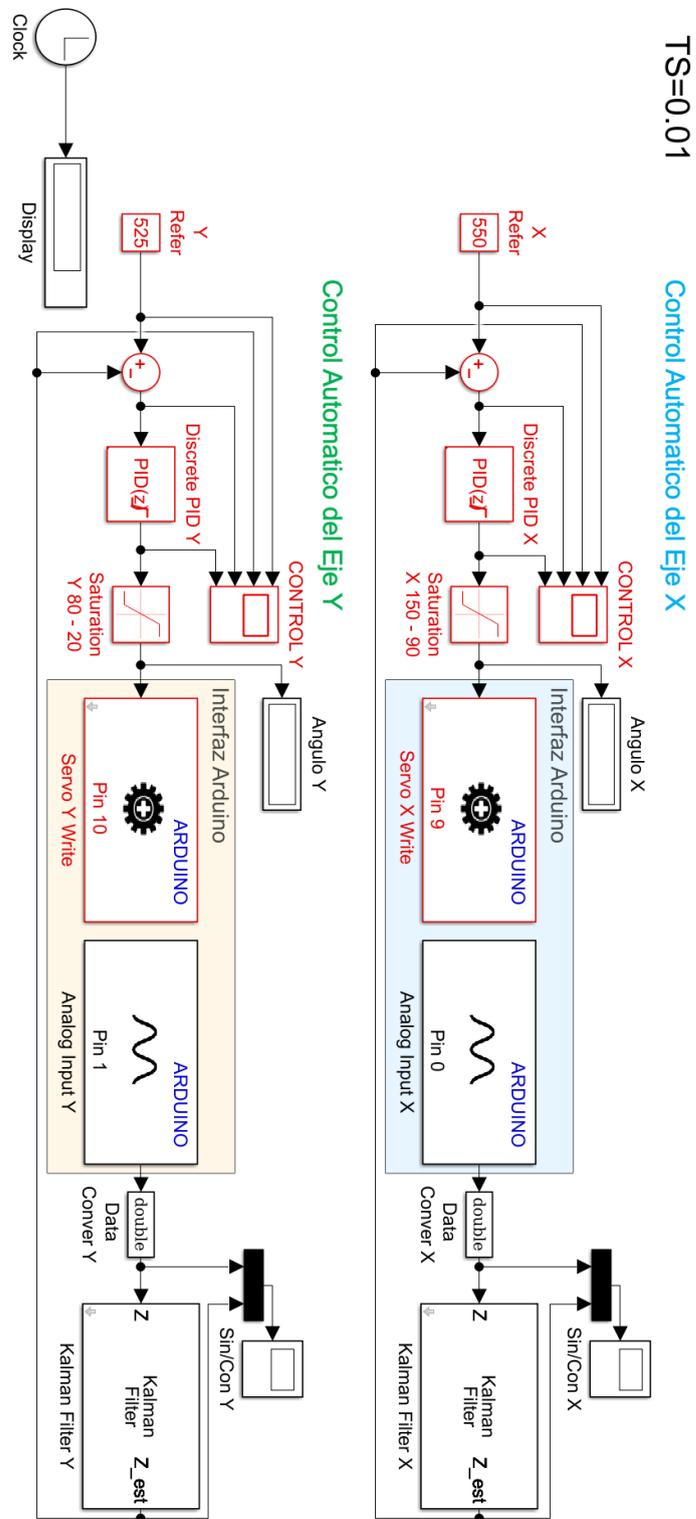


Figura 3. 73: Algoritmo de control PID.

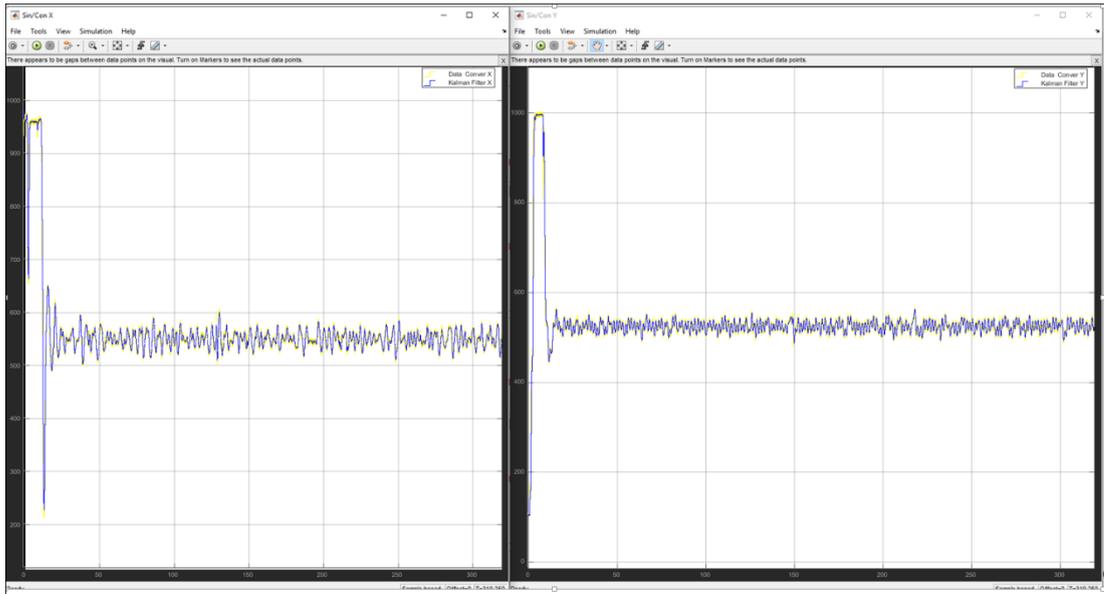


Figura 3. 74: Señal de Control del PID la Plataforma Inercial de 2-GDL.

3.5 Diseño del Algoritmo FUZZY

Para el diseño del algoritmo Fuzzy en la plataforma inercial de 2-GDL se utiliza la aplicación Matlab con ayuda del Toolbox Fuzzy.

Para continuar con el diseño es necesario entender la operación de la planta y en base a esa información se establecen las reglas de membresía y de correspondencia.

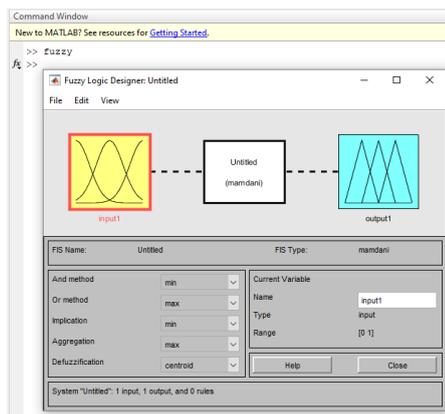


Figura 3. 75: Toolbox Fuzzy de Matlab.

Tal como se explica en la figura 3.76, para llamar al Toolbox es necesario escribir la palabra fuzzy en la ventana de comando de Matlab. El Toolbox Fuzzy como se presenta en la figura 3.77, tiene todas las características para el diseño del algoritmo de control.

Se utiliza el método Mamdani para la creación del algoritmo de control, por lo cual se presenta los diferentes métodos existentes para la creación de algoritmos.

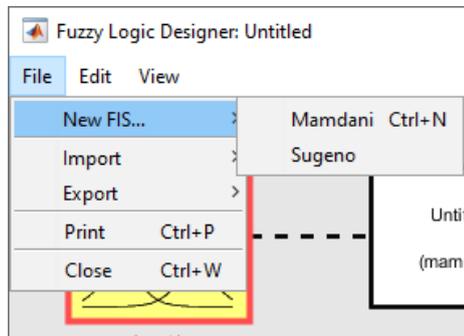


Figura 3. 76: Métodos de creación de algoritmo FUZZY.

Luego de elegir el método de fuzzificación se debe definir las variables de entrada y de salida, para el desarrollo del algoritmo de control FUZZY de la plataforma inercial de 2-GDL

Se definió las siguientes variables de entradas:

- **Error**, representa la retroalimentación de error de la plataforma inercial de 2-GDL
- **D-Error**, representa la derivada de error.

La variable de Salida:

- **Control**, representa la señal de control hacia los servomotores que entrega la posición angular del bloque FUZZY.

Nombre de bloque Fuzzy por cada eje:

- **FuzzyX**, en el entorno de Simulink al utilizar el bloque FUZZY es necesario nombrar al bloque para la definición, para este caso el FUZZY del eje x se llama FuzzyX.
- **FuzzyY**, en el entorno de Simulink al emplear el bloque FUZZY se requiere nombrar al bloque para la definición, para este caso el FUZZY del eje y se llama FuzzyY.

En la figura 3.78 se muestra los bloques FUZZY utilizando el método Maldini con sus respectivas variables de entradas y salidas.

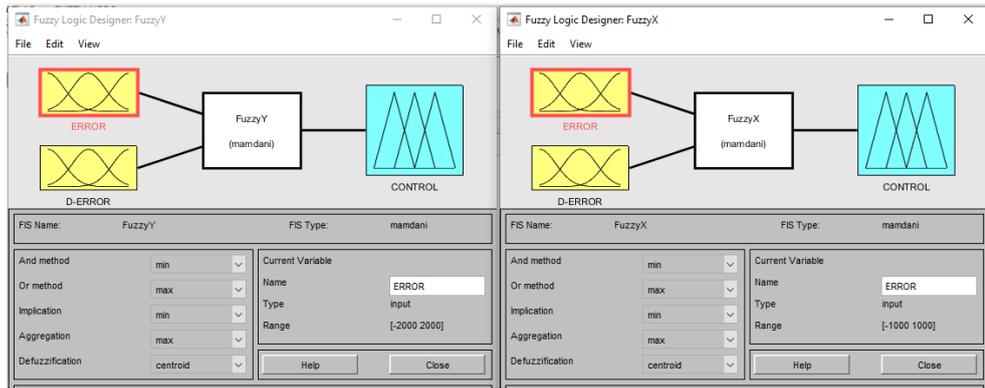


Figura 3. 77: FUZZY y variables para el eje Y y X.

Para editar las funciones de membresía de control tanto para las señales de entrada Error y D-Error y la variable de salida de Control es necesario hacer énfasis en reconocer cómo es el funcionamiento de operación de la planta inercial de 2-GDL.

3.5.1 Diseño del Algoritmo FUZZY en el eje X

El diseño del algoritmo FUZZY para el eje X cuenta con funciones gaussianas para las variables de entrada y de salida como se expone a continuación.

Variables de entrada:

- **Error**, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000 como se explica en la figura 3.79.

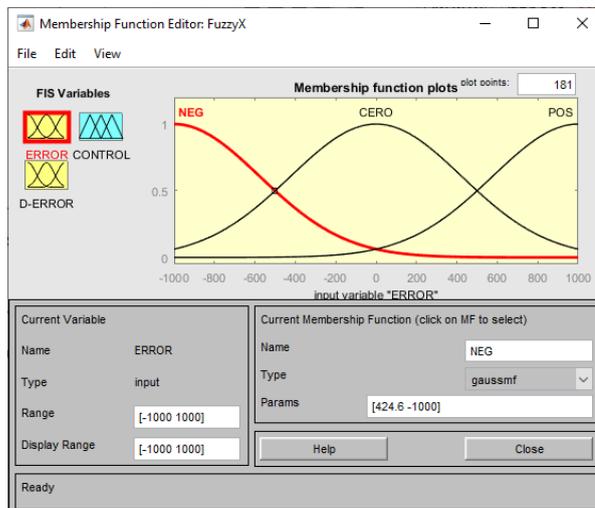


Figura 3. 78: Rango de operación de la señal de ERROR del eje X.

- **D-Error**, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000 como se describe en la figura 3.80.

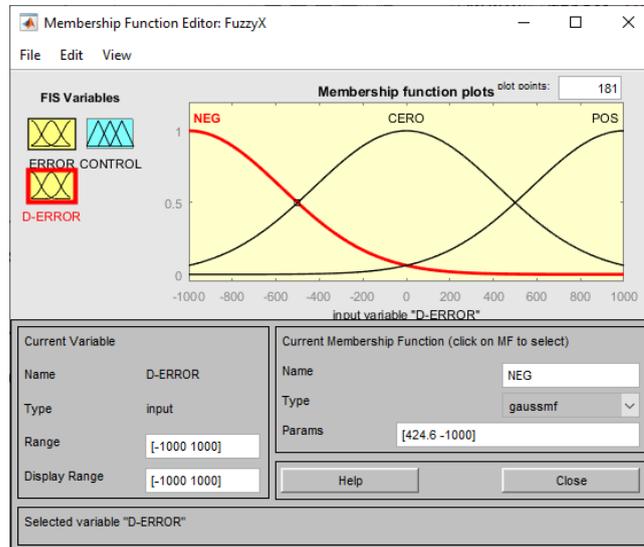


Figura 3. 79: Rango de operación de la señal de D-ERROR del eje X.

Variable de Salida:

- **Control**, tiene 5 funciones de membresía gaussianas que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 107.5 a 127.5, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de X y se explica en la figura 3.81.

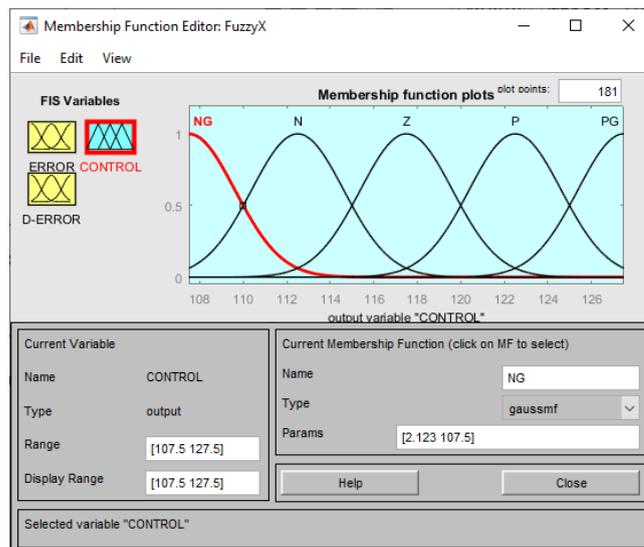


Figura 3. 80: Rango de operación de la señal de CONTROL del eje X.

La señal de CONTROL no se realiza ninguna escala a la salida del FUZZY ya que el rango de operación de la señal gaussiana es el rango de operación del movimiento del servomotor en el eje de la X.

Para la definición de las reglas de correspondencia que indican la acción a tomar, las cuales se muestran en la tabla 3 que tiene la relación de las variables de entras y salidas del controlador FUZZY del eje X.

		D-ERROR		
		NEG	CERO	POS
ERROR	NEG	PG	P	P
	CERO	P	Z	N
	POS	N	N	NG

Tabla 3: Reglas de correspondencia

Con las reglas de correspondencia expuestas en la tabla 3, se ingresan los valores en el editor del Toolbox FUZZY, el cual será exportado al Workspace para luego ser importado al Simulink. Se observa en la figura 3.82 el ingreso de valores en el editor de reglas.

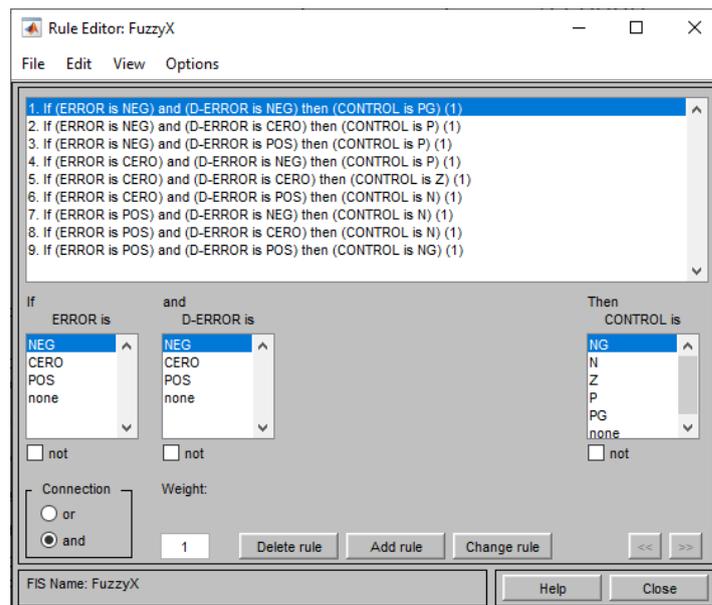


Figura 3. 81: Reglas de correspondencia de control FUZZY del eje X.

Con la creación del controlador FUZZY para el eje X realizado en el Toolbox FUZZY se debe diseñar el diagrama de bloques en Simulink.

Es importante recordar que al diseñar el controlador FUZZY se define dos variables de entradas las cuales son ERROR y D-ERRO para la medición de la velocidad y el cambio de error se implementan estas dos variables de entradas respectivamente. En la variable de entrada de la derivada del error se coloca un bloque derivativo en tiempo discreto para cumplir con lo antes mencionado.

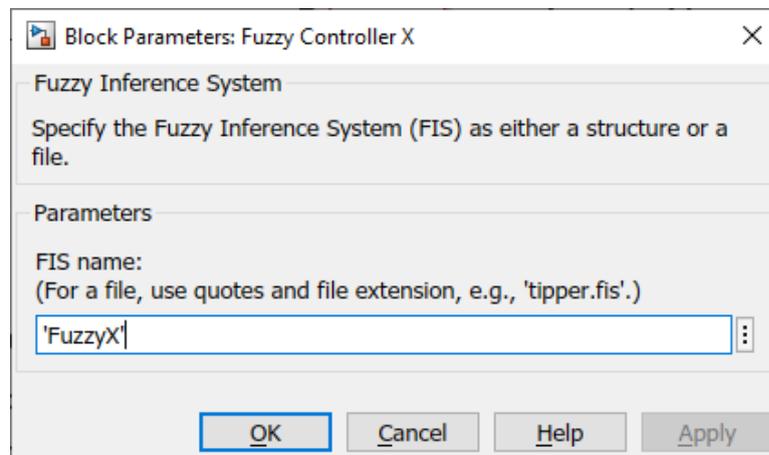


Figura 3. 82: Parámetros del Bloque FUZZY en Simulink.

A continuación, se muestra en la figura 3.83 el diagrama de bloques para el control automático utilizando el bloque FUZZY.

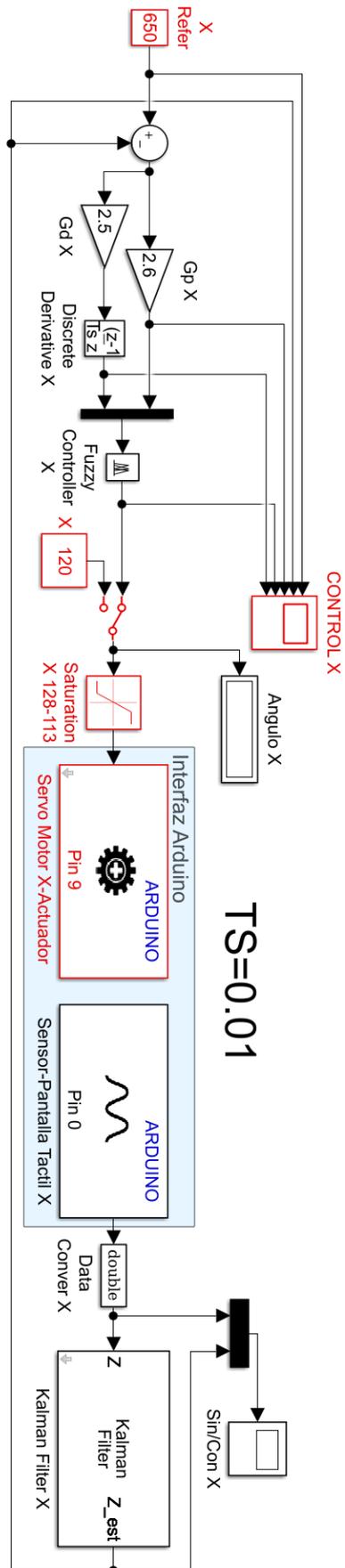


Figura 3. 83: Diagrama de control lógico FUZZY para el eje de las X.

3.5.2 Diseño del Algoritmo FUZZY en el eje Y

El diseño del algoritmo FUZZY para el eje Y contará con funciones gaussianas para las variables de entrada y de salida como explica a continuación

Variables de entradas:

- **Error**, tiene 3 funciones de membresía gaussiana, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000 como se explica en la figura 3.85.

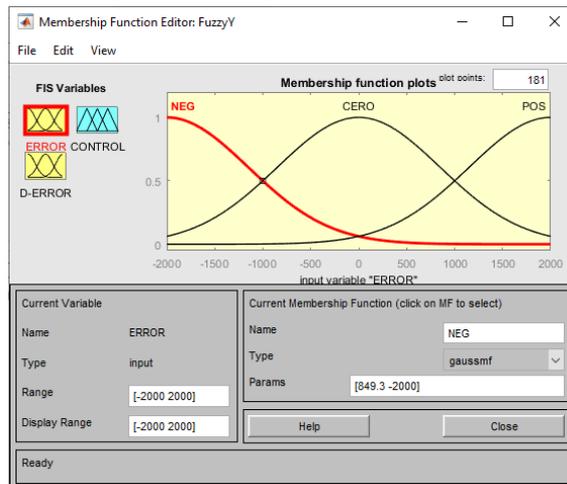


Figura 3. 84: Rango de operación de la señal de ERROR del eje Y.

- **D-Error**, tiene 3 funciones de membresía gaussiana, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000 como se describe en la figura 3.86.

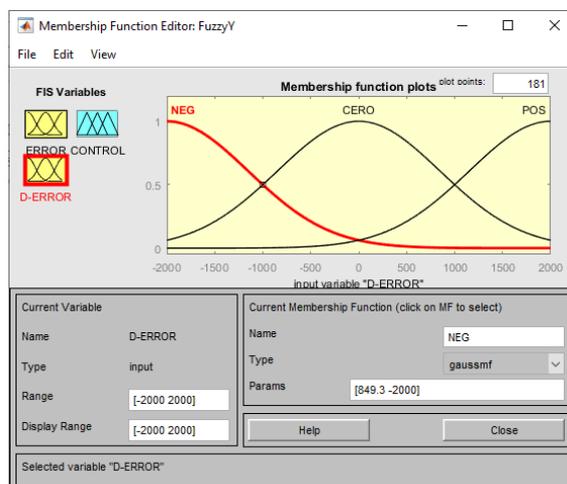


Figura 3. 85: Rango de operación de la señal de D-ERROR del eje Y.

- **Control**, tiene 5 funciones de membresía gaussiana que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 10.5 a 90.5, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de Y, se visualiza en la figura 3.87.

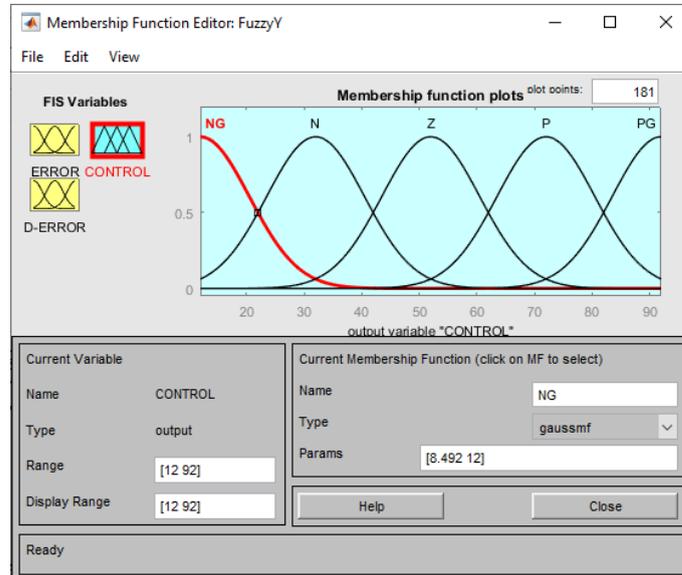


Figura 3. 86: Rango de operación de la señal de CONTROL del eje Y.

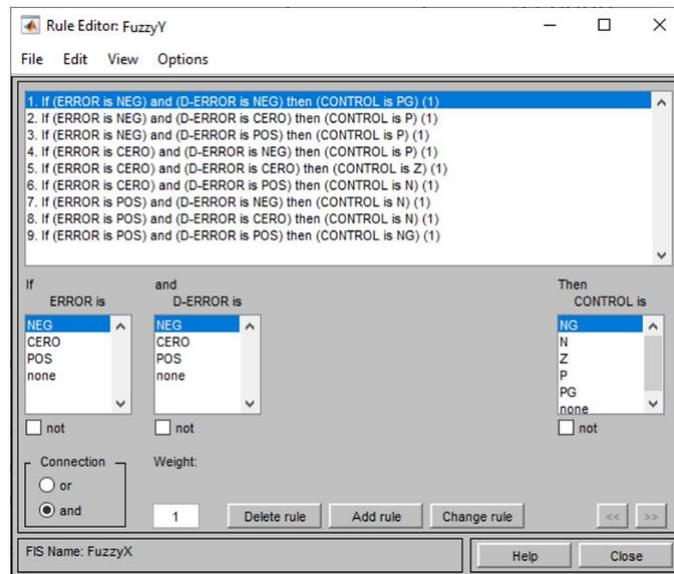


Figura 3. 87: Reglas de correspondencia de control FUZZY del eje Y

La señal de CONTROL no se realiza ninguna escala a la salida del FUZZY ya que el rango de operación de la señal gaussiana es el rango de operación del movimiento del servomotor en el eje de la Y.

Para la definición de las reglas de correspondencia que indican la acción a tomar las cuales se describe en la tabla 3, se tiene la relación de las variables de entras y salidas del controlador FUZZY del eje Y. Se muestra en la figura 3.88 las reglas de correspondencia del eje Y

Con el diseño del contralor FUZZY para el eje Y creado en el Toolbox Fuzzy se establece el diagrama de bloques en Simulink, en la figura 3.89 se observa la creación del bloque FUZZY en Simulink.

Es importante recordar que al diseñar el controlador FUZZY se definió dos variables de entradas las cuales son ERROR y D-ERROR, error y la derivada de error respectivamente.

Para la medición de la velocidad y el cambio de error se implementa las dos variables de entradas antes mencionadas.

En la variable de entrada de la derivada del error se instala un bloque derivativo en tiempo discreto para cumplir con lo antes mencionado.

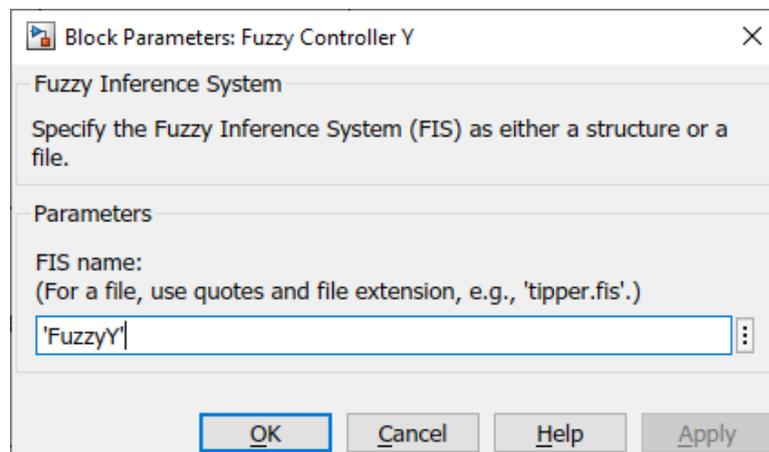


Figura 3. 88: Parámetros del Bloque FUZZY en Simulink.

A continuación, se muestra en la figura 3.90 el diagrama de bloques para el control automático donde se emplea el bloque FUZZY para el eje Y.

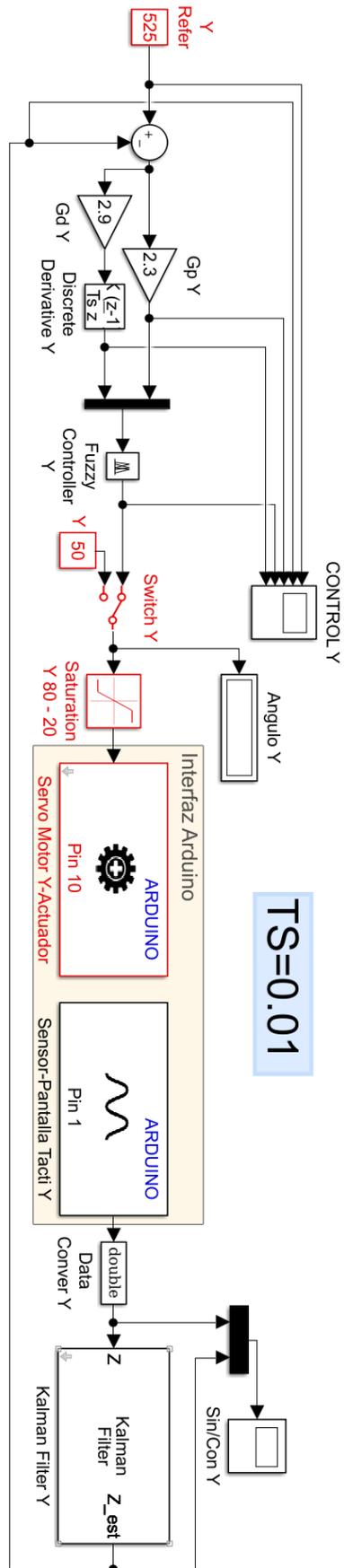


Figura 3. 89: Diagrama de control lógico FUZZY para el eje de las Y.

Luego de crear los controladores FUZZY individualmente, a continuación se realiza el diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.91 para la plataforma inercial de 2-GDL tanto para el eje X y para el eje Y.

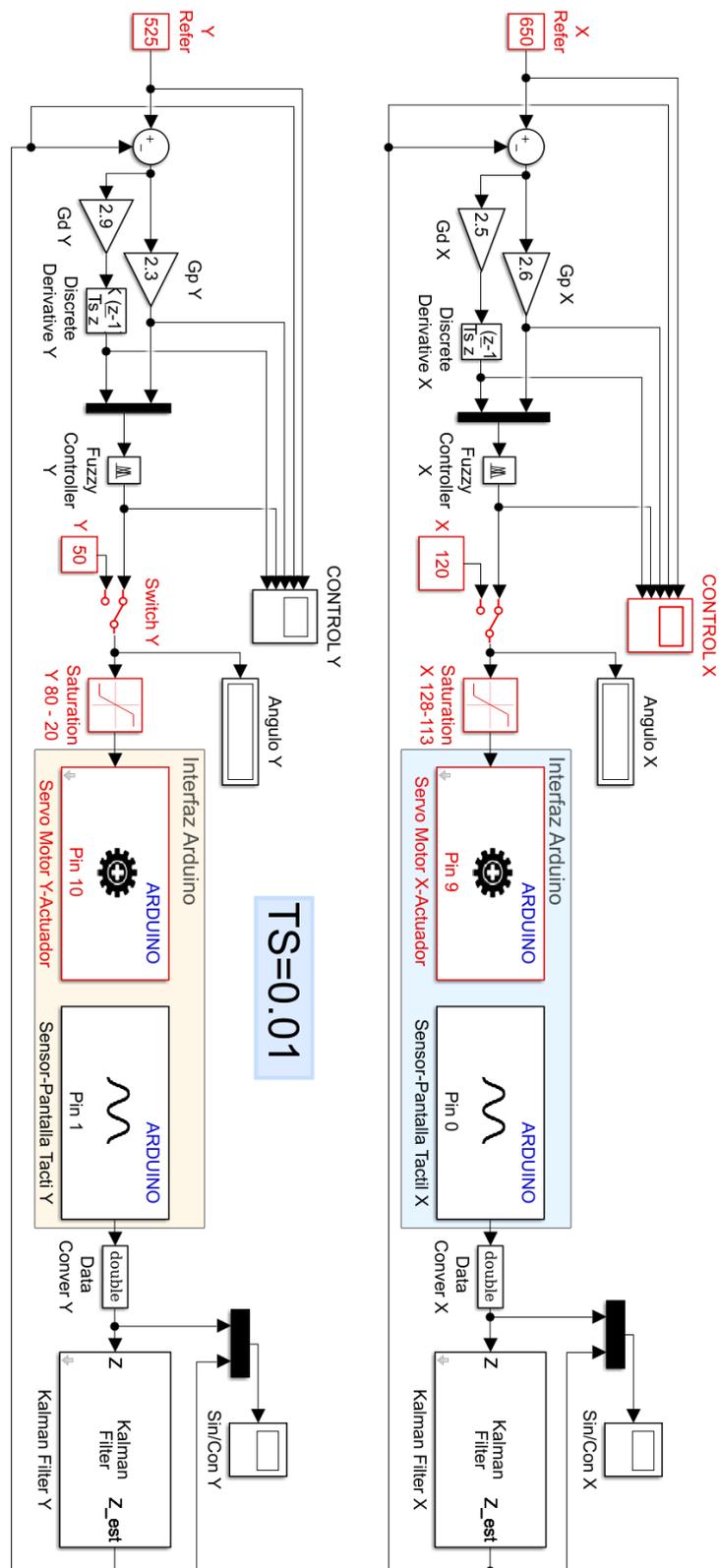


Figura 3. 90: Algoritmo de control FUZZY.

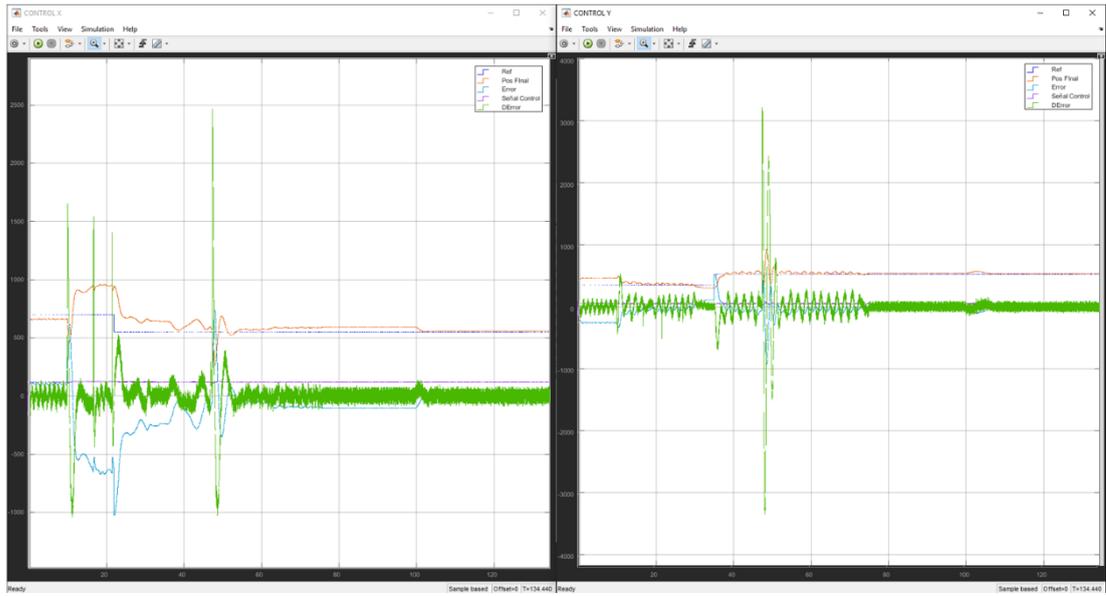


Figura 3. 91: Gráficas del Funcionamiento de control FUZZY

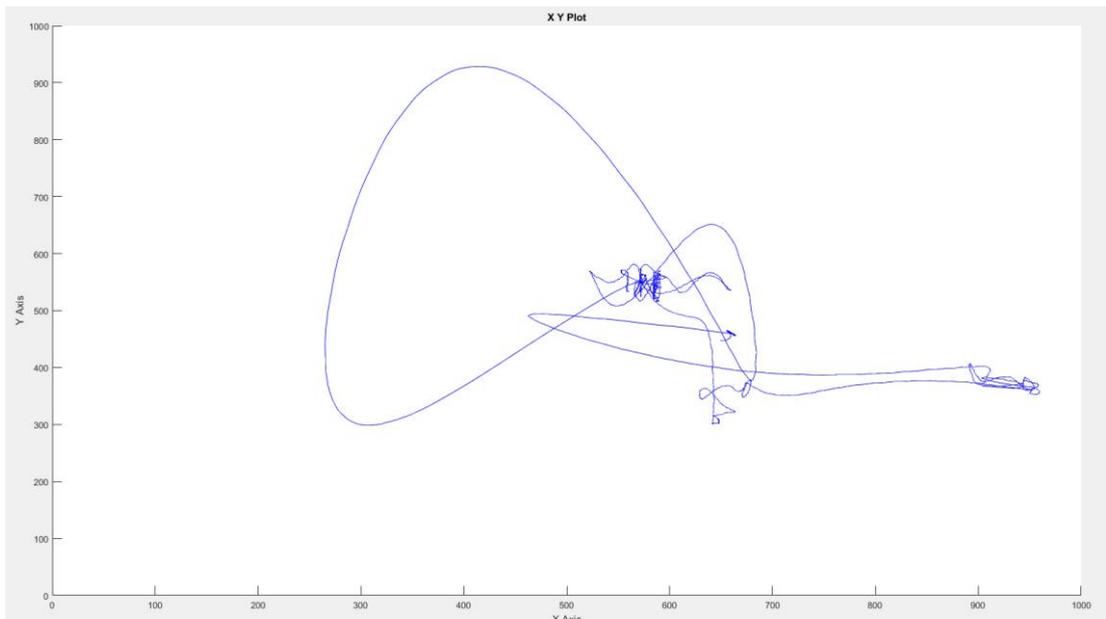


Figura 3. 92: Movimiento de la esfera sobre pantalla táctil

4. GUÍAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

4.1 PRÁCTICA # 1

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control I
NRO. PRÁCTICA:	1	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: LECTURA DE UBICACIÓN DE LA ESFERA EN LA PANTALLA DE LA PLATAFORMA INERCIAL DE 2-GDL CON EL SOFTWARE MATLAB/SIMULINK.
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Conocer la conexión de la pantalla ubicada en la plataforma inercial de 2-GDL. • Instalar el paquete de soporte de Simulink para el hardware Arduino. • Instalar drivers del software Arduino (IDE). • Crear un programa en Simulink para observar los valores de las coordenadas donde se encuentra la esfera. 		
INSTRUCCIONES <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un computador con los programas Matlab/Simulink y Arduino IDE. 2. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 3. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 4. Encender la planta presionando el botón de marcha. 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 		
<p style="text-align: center;">ACTIVIDADES POR DESARROLLAR</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar el paquete de soporte de Simulink para el hardware Arduino. 2. Instalar drivers de Arduino IDE. 3. Guía de pasos para energizar, encender y comunicar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”. 4. Creación del programa para lectura de los valores de coordenadas en la pantalla táctil resistiva de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”. 5. Ejecución del programa de lectura de las coordenadas de posición en la pantalla. 		

Paso 1. Instalar el paquete de soporte de Simulink para el hardware Arduino.

En la pantalla principal del software Matlab dirigirse a HOME >> Add-Ons >> Get Hardware Support Packages.

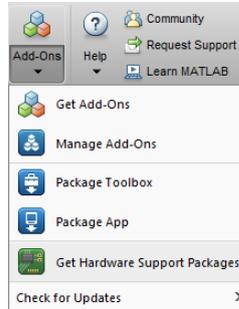


Figura 4. 1: Menú de complementos para Matlab.

Buscar el paquete “Simulink Support Package for Arduino Hardware” e iniciar con la instalación.



Figura 4. 2: Paquete de Simulink para Hardware Arduino.

Cuando se vaya a iniciar el proceso de instalación se debe ingresar las credenciales de una cuenta de MathWorks. En el caso de no contar con una cuenta, la creación de ella es gratis y muy sencilla en la página de MathWorks.

<https://www.mathworks.com/mwaccount/register>

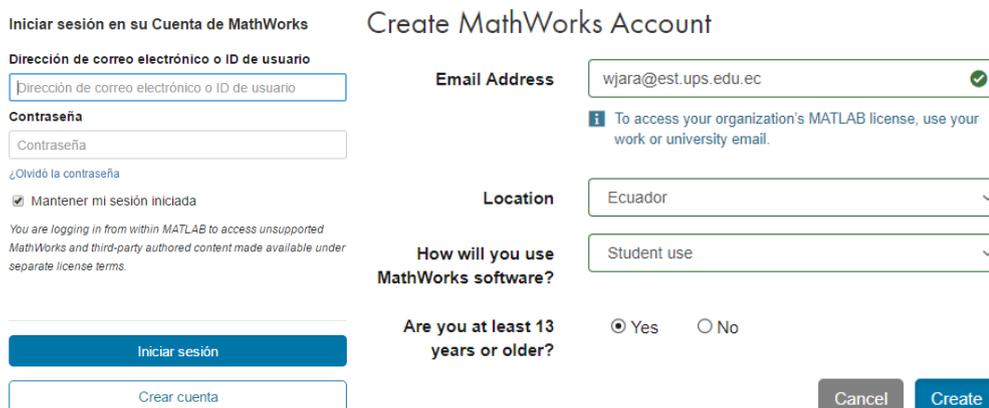


Figura 4. 3: Credenciales para cuenta de MathWorks.

Con la cuenta ingresada, seguir los pasos hasta finalizar la instalación, aceptando términos y condiciones más otros terceros complementos. Una vez descargado e instalado el paquete se procede a instalar los drivers que incluye el software Arduino IDE.

- Download and Installation Progress
- Downloading Support Packages... 100%
 - Downloading Third-Party Packages... 0%
 - Installing Support Packages...
 - Installing Third-Party Packages...
 - Configuring your installation

Figura 4. 4: Paquete de Simulink para hardware Arduino.

Paso 2. Instalar drivers de Arduino IDE.

Este software se lo descargar de forma gratuita directamente de la página oficial de arduino. <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. En el proceso de instalación del software Arduino IDE es fundamental que se incluya la instalación de todos los complementos para la comunicación del hardware Arduino con el computador y por ende con el software Matlab/Simulink.

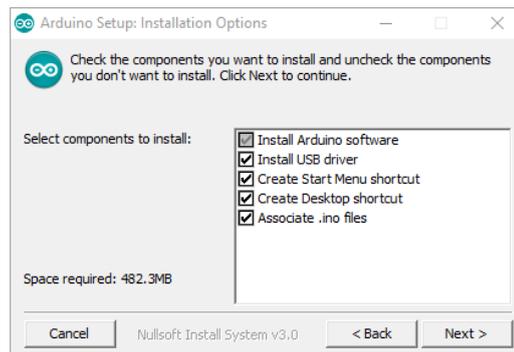


Figura 4. 5: Componentes para instalación completa de Arduino IDE.

Este software de Arduino contiene los drivers necesarios para utilizar la placa Arduino DUE en el software Matlab/Simulink que sirve para comunicar la plataforma inercial y el computador.

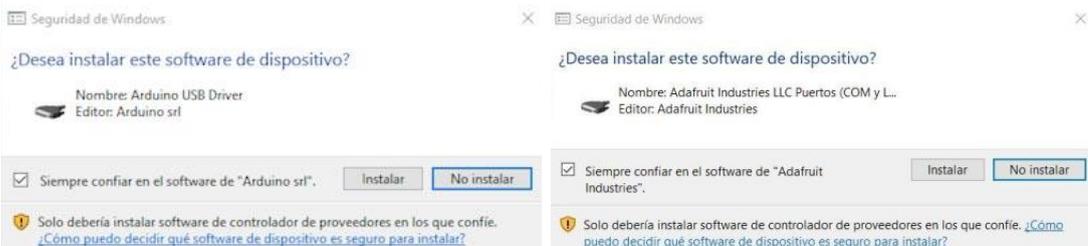


Figura 4. 6: Instalación de para comunicar las placas Arduino.

Paso 3. Guía de pasos para energizar, encender y comunicar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.

Conectar el cable de poder en el costado izquierdo de la plataforma como se ve en la ilustración, esta conexión cuenta con un fusible de 110V/2A como protección de sobre voltajes. Inmediatamente, si el paro de emergencia no se encuentra pulsado, se encenderá la luz piloto roja lo que indica que la planta está alimentada con 110V.



Figura 4. 7: Conector IEC y luz piloto indicadora de conexión.

Se presiona el botón de marcha lo que encenderá la luz piloto verde que indica que la planta se ha encendido.



Figura 4. 8: Activación de botón marcha y luz piloto ON/OFF.

Se conecta la planta con el computador utilizando un cable USB macho-macho para iniciar la comunicación con el hardware de Arduino.



Figura 4. 9: Conexión de cable USB en la planta y el computador.

Al estar conectados ambos dispositivos, se muestra en la pantalla principal de Matlab un mensaje que indica, el dispositivo se encuentra listo para usarlo con el paquete de soporte de Simulink para Arduino, caso contrario repetir paso 1.

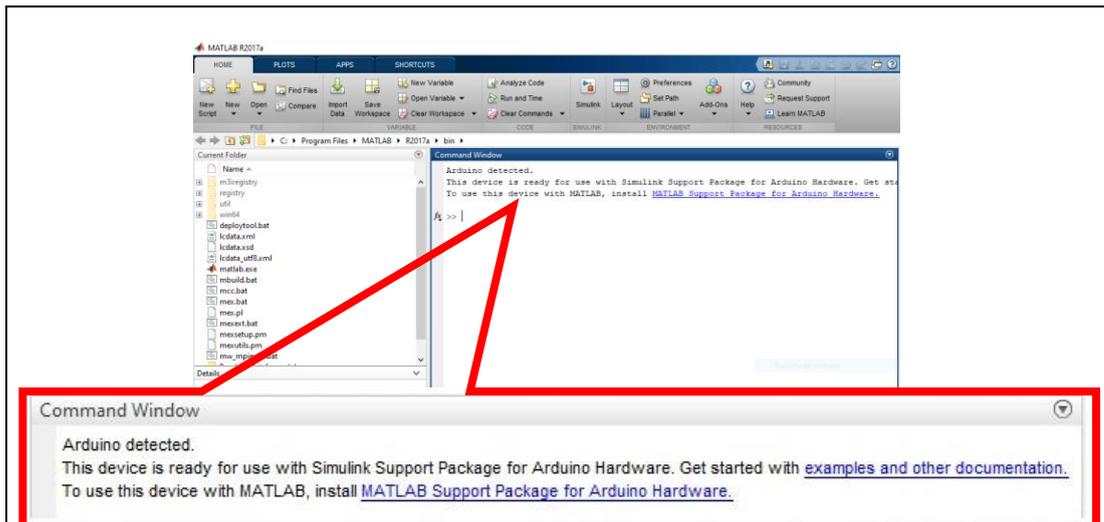


Figura 4. 10: Reconocimiento conexión de una placa Arduino.

Paso 4. Creación del programa para lectura de los valores de coordenadas en la pantalla táctil resistiva de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.

Ahora que se puede utilizar el paquete de soporte de Simulink para Arduino se procede a verificar que los componentes reciban y envíen datos sin ningún problema. Se procede a abrir un modelo en blanco en la herramienta Simulink.

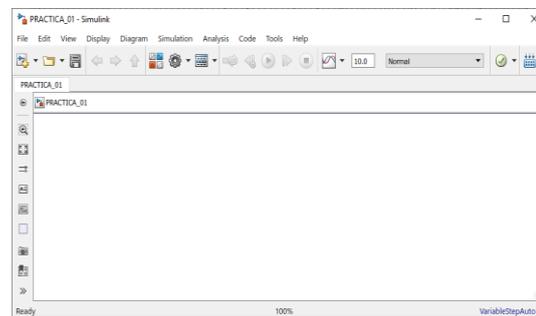


Figura 4. 11: Modelo en blanco de Simulink.

Para abrir la librería de Simulink, dirigirse a View>>Library Browser. Aquí se encuentra el paquete de Simulink para Arduino previamente instalado, ahora para la lectura de la pantalla táctil resistiva se necesita las entradas analógicas del arduino DUE.

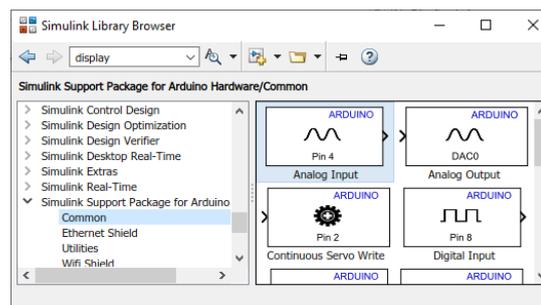


Figura 4. 12: Bloque “Analog Input” del paquete de soporte para Arduino.

Se crea un modelo en Simulink usando los bloques de entrada analógica para lectura de las coordenadas en la pantalla. Se inserta dos bloques a la pantalla principal designando el Pin 0 y Pin1 para posición de X y Y respectivamente.

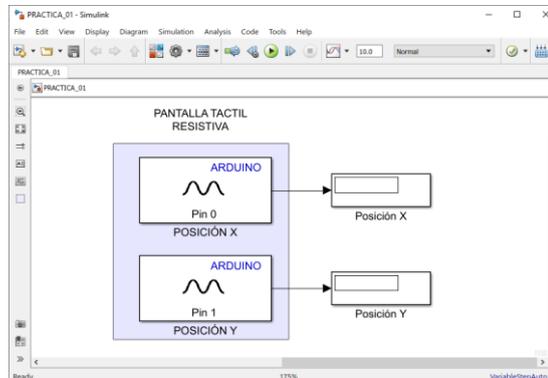


Figura 4. 13: Lectura de coordenadas con bloques de entradas analógicas.

Antes de ejecutar el programa se debe seleccionar el hardware a utilizar en los parámetros de configuración de Simulink, elegir la placa 'Arduino DUE'. Se aplica los parámetros por defecto para la selección del puerto COM en automático y se crea una variable para el tiempo de muestreo en la ventana de comandos. $T_s = 0.01$. Se Aplican y aceptan los cambios.

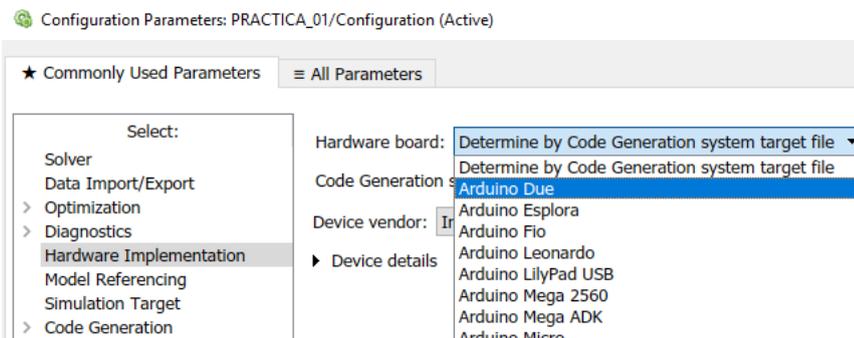


Figura 4. 14: Parámetros de configuración Arduino DUE

Se selecciona el modo de simulación externo y un tiempo infinito como parada de la simulación del programa.

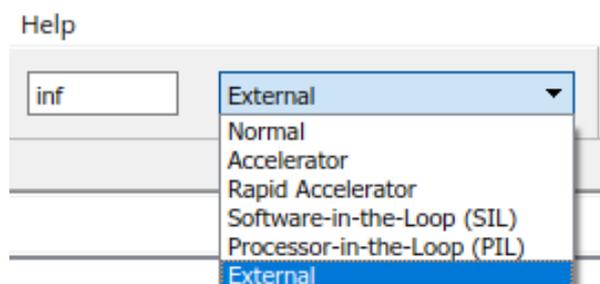


Figura 4. 15: Selección del modo de simulación.

Paso 5. Ejecución del programa de lectura de las coordenadas de posición en la pantalla.

Se procede a ejecutar el programa con todas las configuraciones para la correcta conexión con el hardware Arduino DUE.

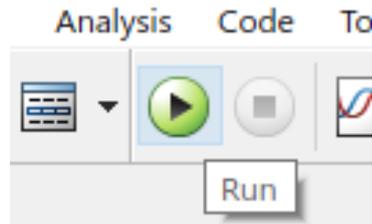


Figura 4. 16: Botón de ejecución en Simulink.

Aquí se debe observa la lectura de las coordenadas en el eje X y eje Y en un bloque 'display'. El bloque representa el voltaje como un valor digital (0-1023, mínimo a máximo).

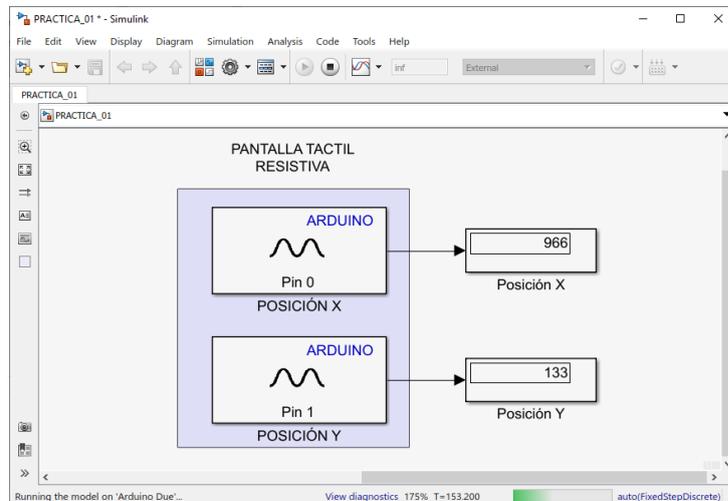


Figura 4. 17: Práctica #1 ejecutada en tiempo real.

Estamos listo para realizar las pruebas de adquisición de datos de la pantalla táctil resistiva.

Los valores obtenidos están el rango de 0 a 1023 y se observa de acuerdo a la ubicación de la esfera sobre la pantalla táctil.

Se debe tener una esfera de un peso de 92 a 96 gramos para un correcto funcionamiento.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

Con el programa donde se obtiene los valores de la posición de la esfera en la pantalla táctil resistiva, se puede mover manualmente la esfera para observar los cambios que produce su movimiento en la lectura de Simulink.

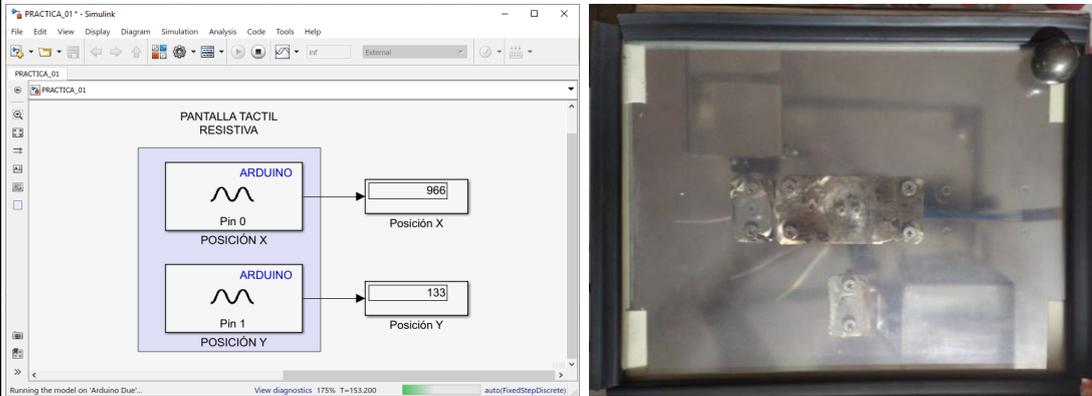


Figura 4. 18: Lectura de posición superior derecha en la pantalla.

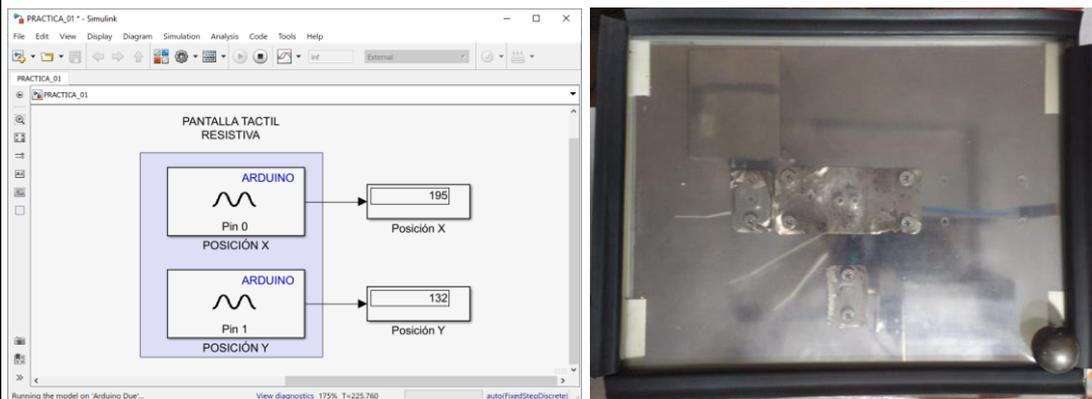


Figura 4. 19: Lectura de posición inferior derecha en la pantalla.

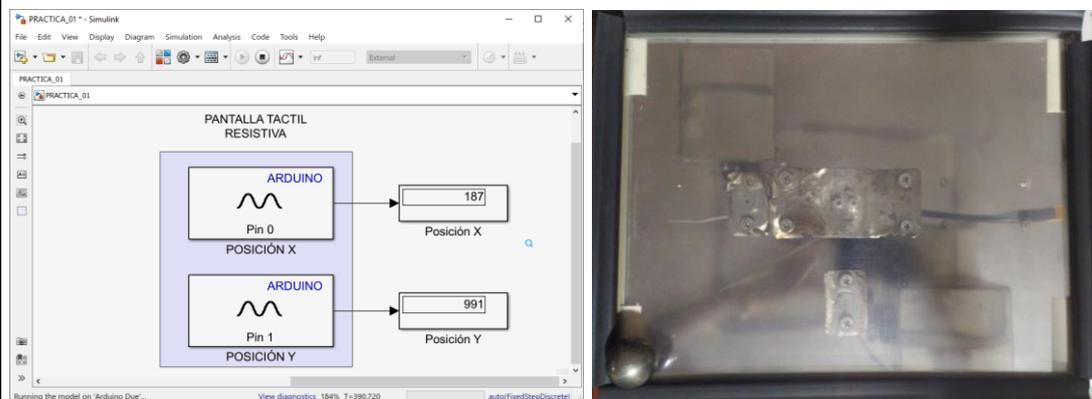


Figura 4. 20: Lectura de posición inferior izquierda en la pantalla.

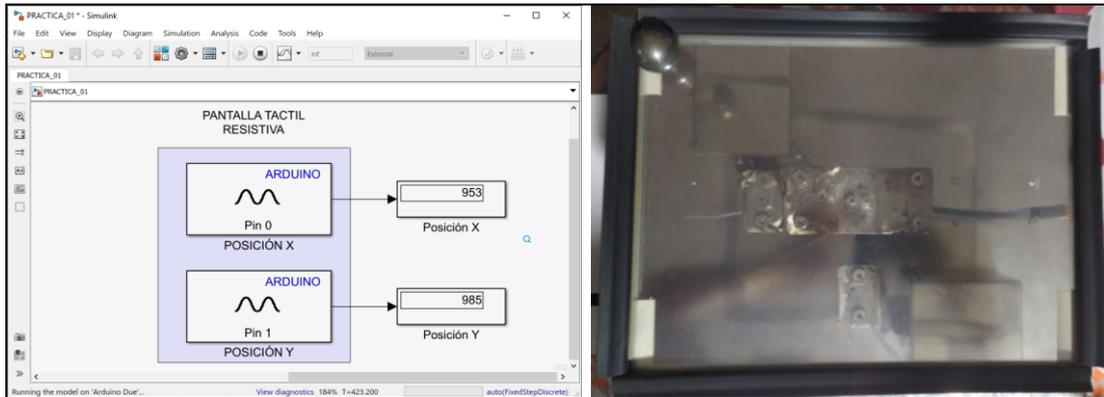


Figura 4. 21: Lectura de posición superior izquierda en la pantalla.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con la pantalla táctil resistiva de la plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink.
- Las librerías y paqueterías incluidas en matlab se utilizan para la conexión USB que comunica la placa arduino y el computador.
- Utilizando los bloques de la librería para Arduino se logra obtener la lectura de los valores de coordenadas del cuerpo útil en la pantalla táctil resistiva.
- El tiempo de muestreo que se utiliza es 0.01 seg. por las velocidades de procesamiento en la placa Arduino DUE.

4.2 PRÁCTICA # 2

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control I
NRO. PRÁCTICA:	2	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: EXPERIMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SERVOMOTOR EN EL EJE X.
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none">• Conocer la conexión del motor-X ubicado en la plataforma inercial de 2-GDL.• Identificar el movimiento en el eje-X del plato donde se encuentra la pantalla táctil resistiva.• Crear un programa en Simulink para enviar los valores de ángulos hacia el motor-X.• Generar una señal sinusoidal para el movimiento en el eje-X de la pantalla táctil resistiva ubicada en el plato.		
INSTRUCCIONES	<ol style="list-style-type: none">1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC.2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada.3. Encender la planta presionando el botón de marcha.4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1).5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho.6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta.	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR <ol style="list-style-type: none">1. Creación del programa para la escritura de los valores angulares del motor-X ubicado en la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.3. Envío de los valores de ángulos hacia el motor-X usando el bloque de escritura para servomotores.4. Agregar una señal sinusoidal con los valores de ángulos para un movimiento continuo del plato.		

Paso 1. Creación del programa para la escritura de los valores angulares del motor-X ubicado en la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos desde la librería de Simulink.

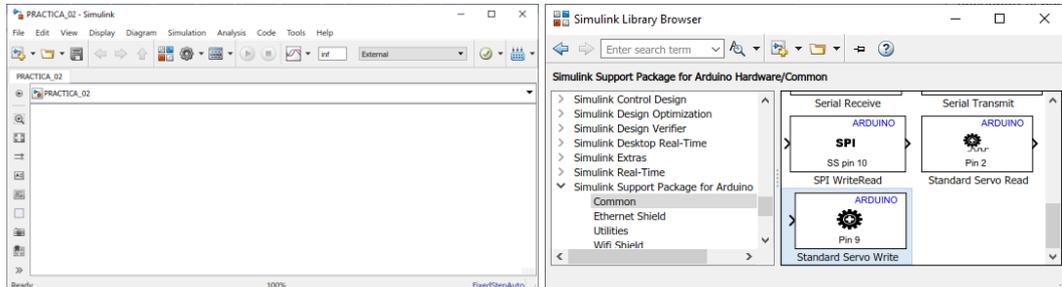


Figura 4. 22: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Con un bloque de valor constante se puede asignar el ángulo que se envía como escritura para el servomotor.

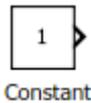


Figura 4. 23: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

Se crea un modelo en Simulink utilizando, el bloque de escritura estándar para servos y el bloque constante, donde el valor constante ingresa directamente al bloque del servomotor. El pin designado para el motor-X es el número 9.

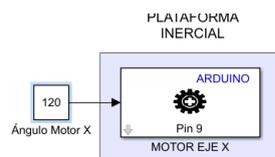


Figura 4. 24: Modelo para escritura de ángulos al motor-X.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Agregando el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.



Figura 4. 25: Bloque “Saturation” en la librería de Simulink.

El motor-X trabaja de 90° a 150° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

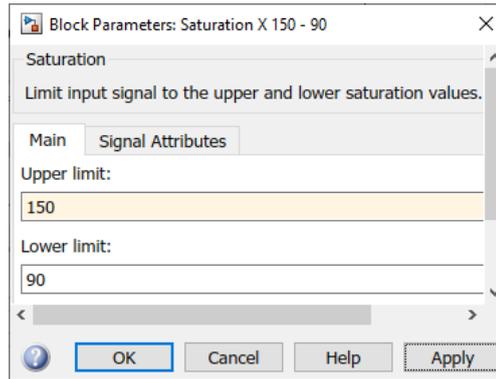


Figura 4. 26: Parámetros del Bloque “Constant”.

Paso 3. Envío de los valores de ángulos hacia el motor-X usando el bloque de escritura para servomotores.

Antes de ejecutar, se debe seleccionar el hardware a utilizar, la placa Arduino DUE, más el tiempo de muestreo en el Workspace de $T_s = 0.01$. Se aplican y aceptan los cambios. El modo de simulación es externo y un tiempo infinito como parada de la simulación. Se ejecuta el programa.

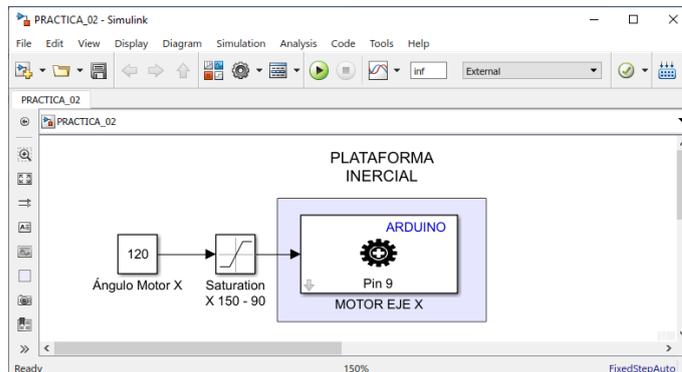


Figura 4. 27: Ángulos para motor-X con límites de saturación.

Paso 4. Agregar una señal sinusoidal con los valores de ángulos para un movimiento continuo del plato.

Para evidenciar un movimiento oscilatorio del plato, se agrega un bloque de onda sinusoidal. Con los siguientes parámetros:

- Amplitud: 30
- Bias: 120
- Frecuencia: 6.28 rad/sec
- Tiempo de muestreo: 0.01 sec

A continuación se muestra la configuración del bloque en mención con ayuda del bloque “Sine Wave” que se encuentra en la Librería de arduino en la librería de arduino

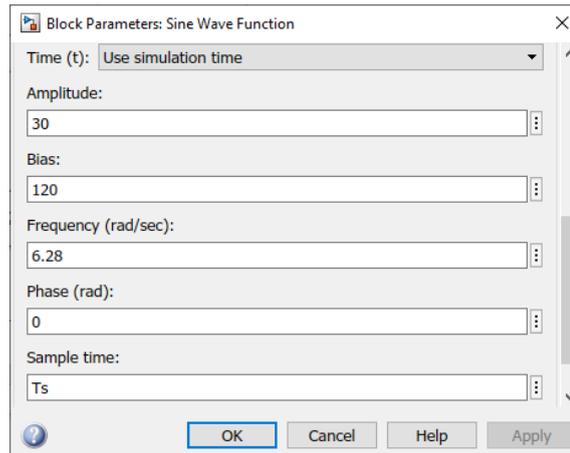


Figura 4. 28: Parámetros del Bloque “Sine Wave”.

Nuevamente se ejecuta el programa con la onda sinusoidal para comprobar el movimiento del plato.

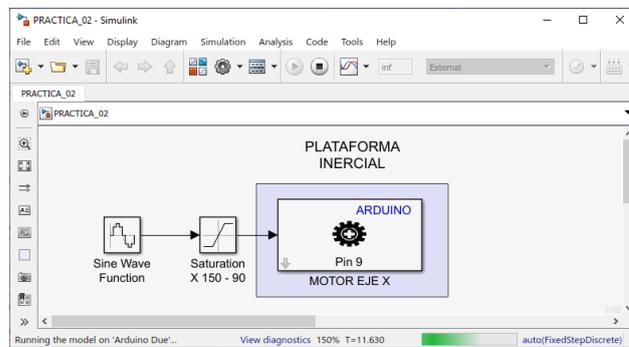


Figura 4. 29: Práctica #2 ejecutada en tiempo real.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del plato, cuando se envía un valor de ángulo de 150° .

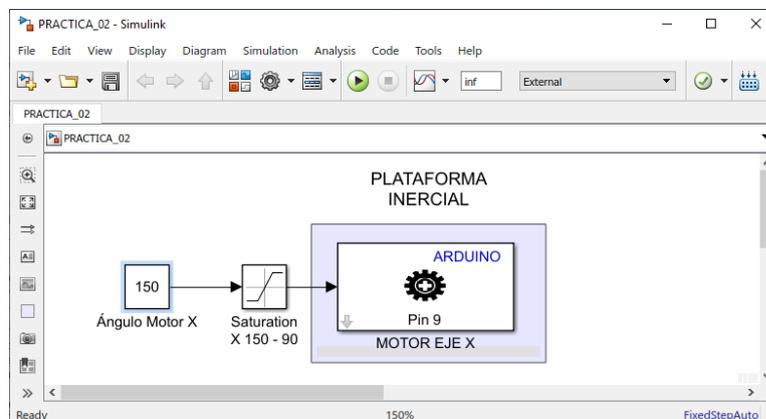


Figura 4. 30: Valor de 150° enviado al servomotor.



Figura 4. 31: Posición del plato a 150° en el eje-X.

- Se comprueba la posición del plato, cuando se envía un valor de ángulo de 90°.

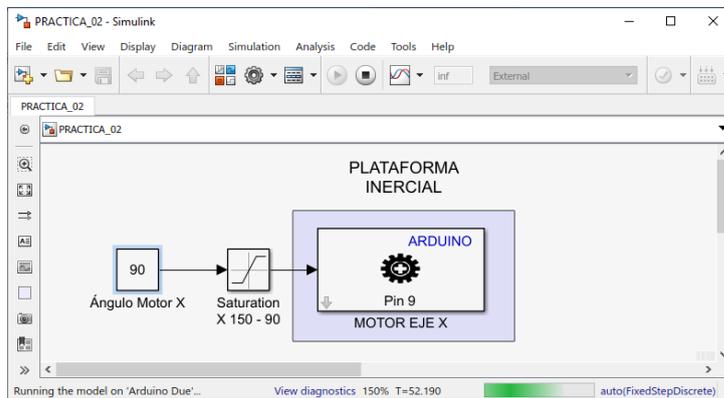


Figura 4. 32: Valor de 90° enviado al servomotor.

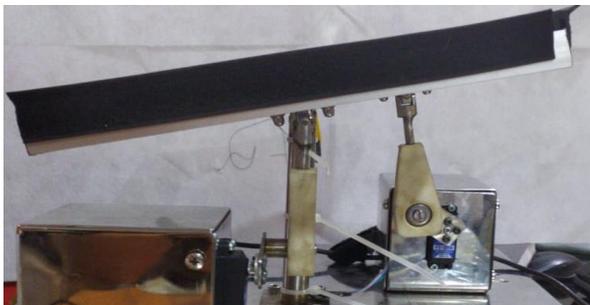


Figura 4. 33: Posición del plato a 90° en el eje-X.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-X de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink.
- El bloque de escritura para el servomotor recibe valores directos de ángulos sin ningún tipo de conversión de datos, por lo que facilita el control del mismo.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.

4.3 PRÁCTICA # 3

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control I
NRO. PRÁCTICA:	3	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: EXPERIMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SERVOMOTOR EN EL EJE Y.
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none">• Conocer la conexión del motor-Y ubicado en la plataforma inercial de 2-GDL.• Identificar el movimiento en el eje-Y del plato donde se encuentra la pantalla táctil resistiva.• Crear un programa en Simulink para enviar los valores de ángulos hacia el motor-Y.• Generar una señal sinusoidal para el movimiento en el eje-Y de la pantalla táctil resistiva ubicada en el plato.		
INSTRUCCIONES	<ol style="list-style-type: none">1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC.2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada.3. Encender la planta presionando el botón de marcha.4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1).5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho.6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta.	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR <ol style="list-style-type: none">1. Creación del programa para la escritura de los valores angulares del motor-Y ubicado en la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.3. Envío de los valores de ángulos hacia el motor-Y usando el bloque de escritura para servomotores.4. Agregar una señal sinusoidal con los valores de ángulos para un movimiento continuo del plato.		

Paso 1. Creación del programa para la escritura de los valores angulares del motor-Y ubicado en la planta “Plataforma inercial de 2-GDL”.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos desde la librería de Simulink.

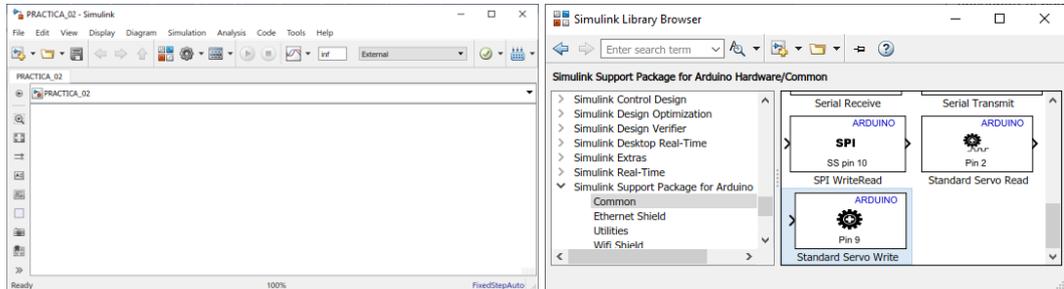


Figura 4. 34: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Con un bloque de valor constante se puede asignar el ángulo que se envía como escritura para el servomotor.

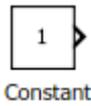


Figura 4. 35: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

Se crea un modelo en Simulink utilizando, el bloque de escritura estándar para servos y el bloque constante, donde el valor constante ingresa directamente al bloque del servomotor. El pin designado para el motor-Y es el número 10.

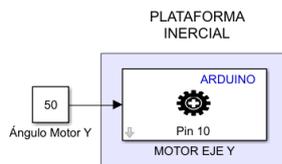


Figura 4. 36: Modelo para escritura de ángulos al motor-Y.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Se agrega el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.

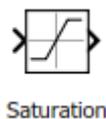


Figura 4. 37: Bloque “Saturation” en la librería de Simulink.

El motor-Y trabaja de 20° a 80° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

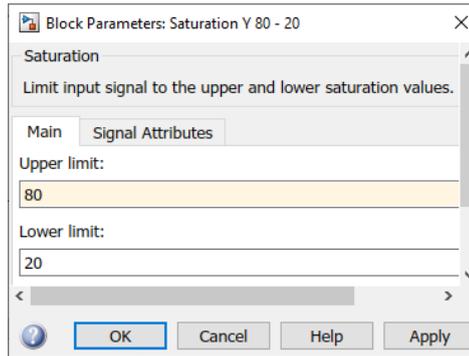


Figura 4. 38: Parámetros del Bloque “Constant”.

Paso 3. Envío de los valores de ángulos hacia el motor-Y usando el bloque de escritura para servomotores.

Antes de ejecutar, se debe seleccionar el hardware a utilizar, la placa Arduino DUE, más el tiempo de muestreo en el Workspace de $T_s = 0.01$. Se aplican y aceptan los cambios. El modo de simulación es externo y un tiempo infinito como parada de la simulación. Se ejecuta el programa.

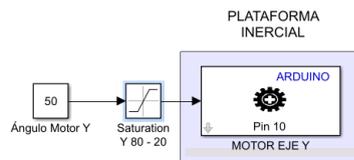


Figura 4. 39: Ángulos para el motor-Y con límites de saturación.

Paso 4. Agregar una señal sinusoidal con los valores de ángulos para un movimiento continuo del plato.

Para evidenciar un movimiento oscilatorio del plato, se agrega un bloque de onda sinusoidal. Con los siguientes parámetros:

- Amplitud: 30
- Bias: 50
- Frecuencia: 6.28 rad/sec
- Tiempo de muestreo: 0.01 sec

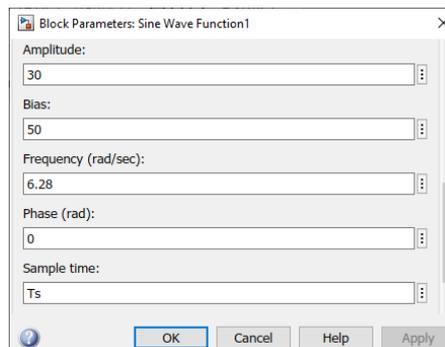


Figura 4. 40: Parámetros del Bloque “Sine Wave”.

Nuevamente se ejecuta el programa con la onda sinusoidal para comprobar el movimiento del plato.

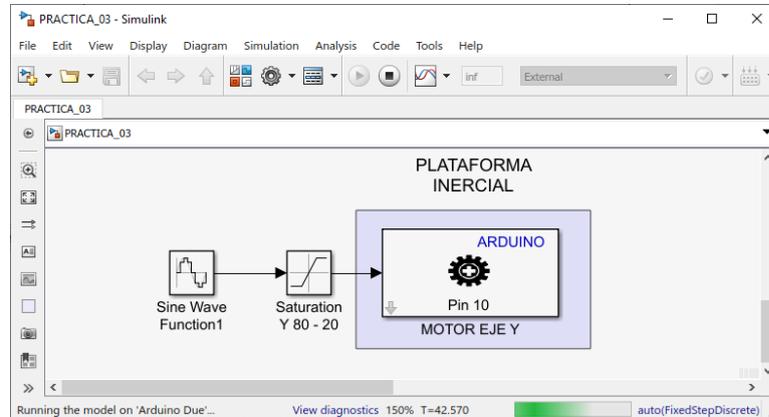


Figura 4. 41: Práctica #3 ejecutada en tiempo real.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del plato, cuando se envía un valor de ángulo de 80° .

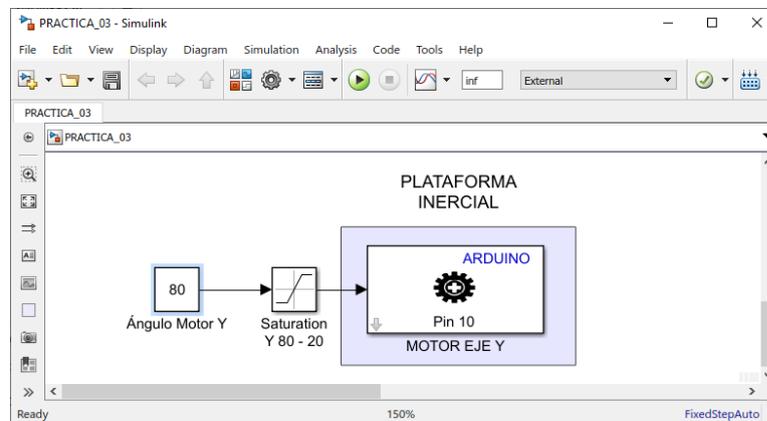


Figura 4. 42: Valor de 80° enviado al servomotor.

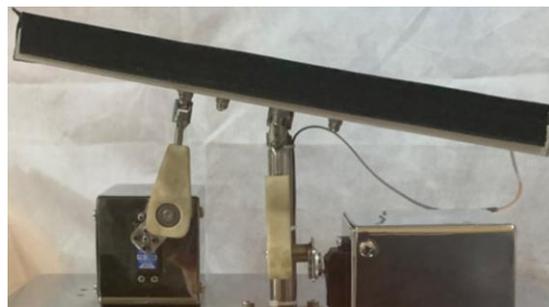


Figura 4. 43: Posición del plato a 80° en el eje-Y.

- Se comprueba la posición del plato, cuando se envía un valor de ángulo de 90° .

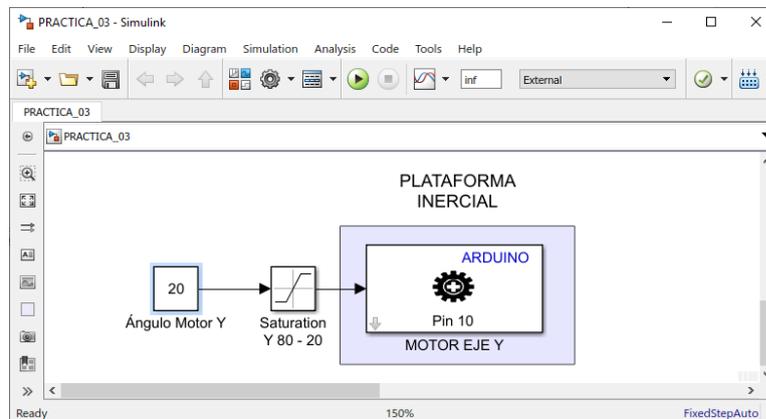


Figura 4. 44: Valor de 20° enviado al servomotor.



Figura 4. 45: Posición del plato a 20° en el eje-Y.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-Y de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink.
- El bloque de escritura para el servomotor recibe valores directos de ángulos sin ningún tipo de conversión de datos, por lo que facilita el control del mismo.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.

4.4 PRÁCTICA # 4

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control II	
NRO. PRÁCTICA:	4	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL PID PARA EL EJE X.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Creación de un controlador PID para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque PID y sus atributos. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del PID en el eje X a la plataforma inercial de 2-GDL. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control PID para el eje X de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia. 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato. 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE. 4. Agregar el bloque PID discreto. 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas. 			

Paso 1. Creación del algoritmo de control PID para el eje X de la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización del objeto en la referencia.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos y el bloque “Analog Input” desde la librería de Simulink.

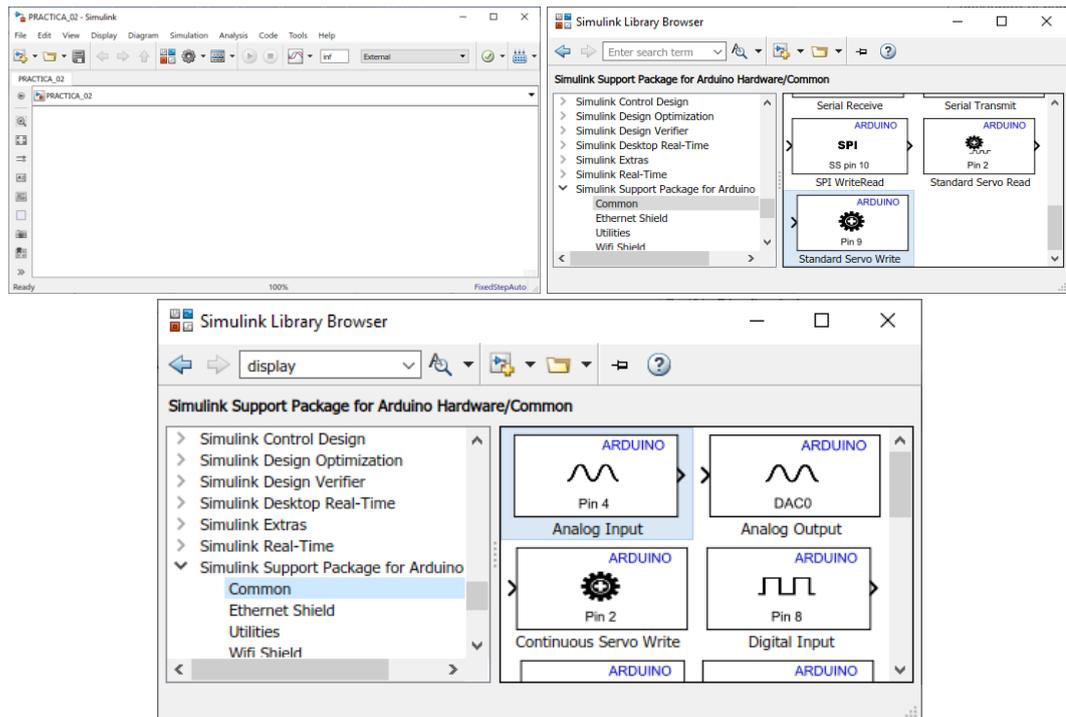


Figura 4. 46: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede a añadir el bloque DATA CONVERT a la salida del bloque de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico.

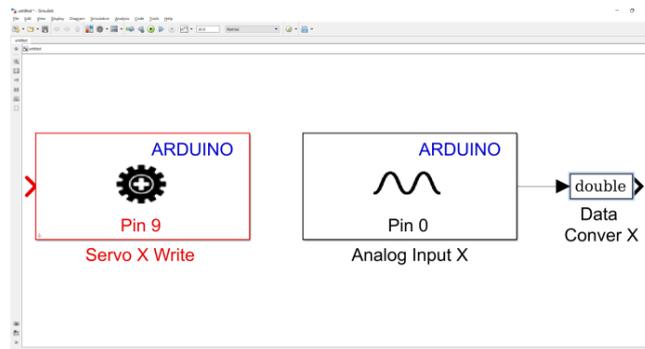


Figura 4. 47: Bloque “Data conver X” con la variable “doublé”.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Se agrega el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.



Figura 4. 48: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-Y trabaja de 90° a 150° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

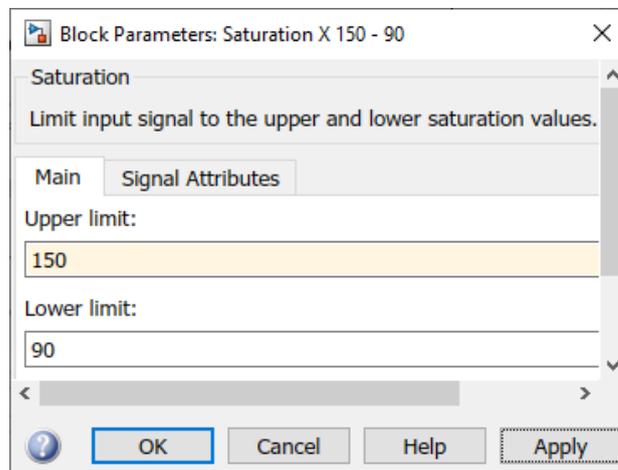


Figura 4. 49: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation”

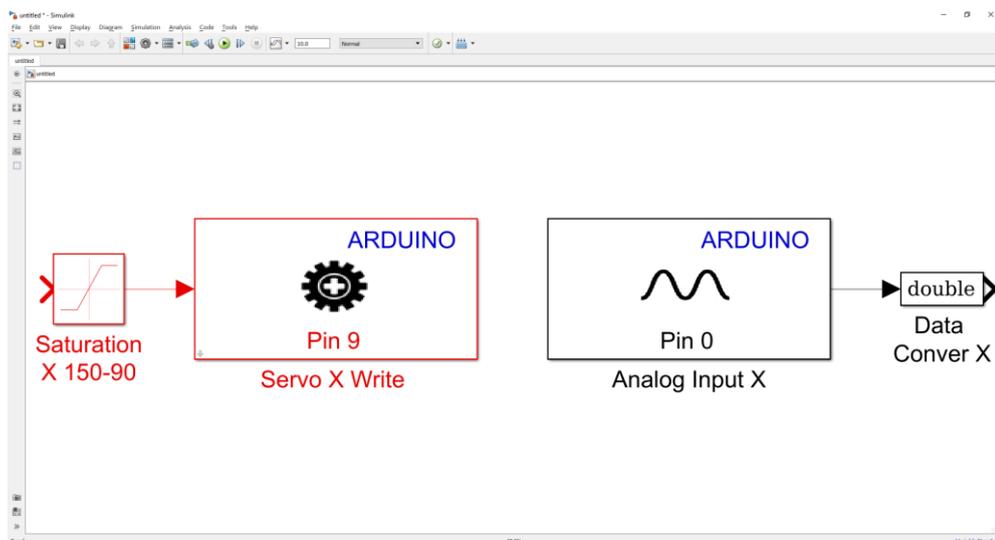


Figura 4. 50: Bloque de saturación para el servomotor X.

Paso 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida del bloque Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir el bloque “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

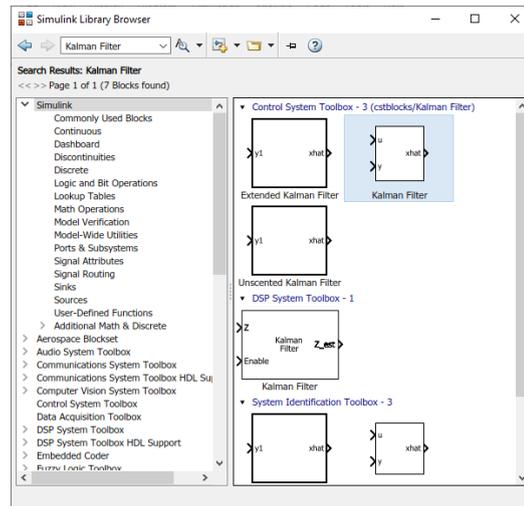


Figura 4. 51: Bloque “Kalman Filter” en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

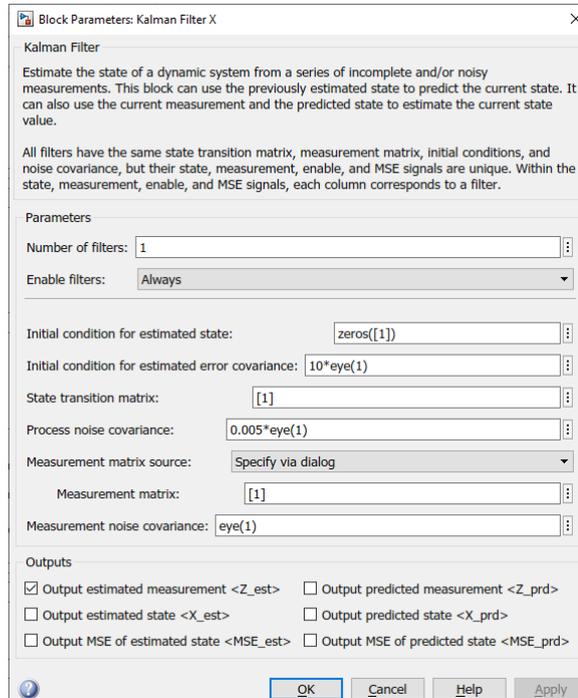


Figura 4. 52: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control PID para el eje X.

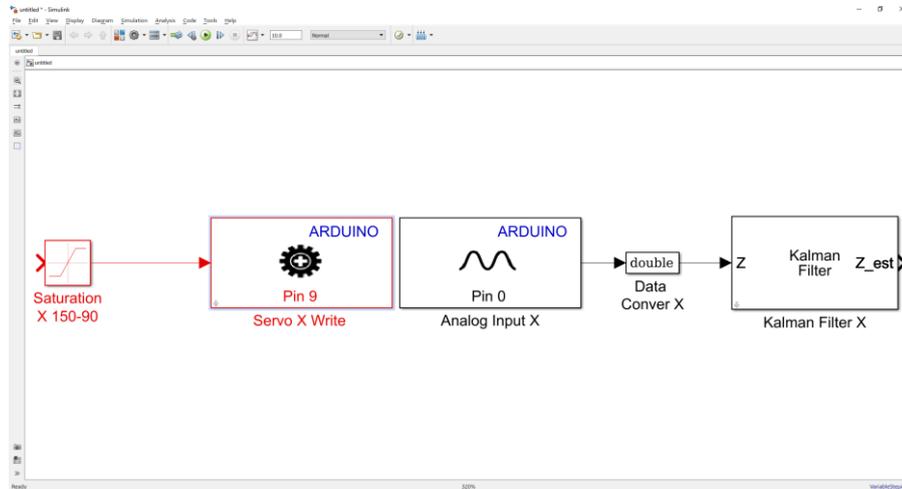


Figura 4. 53: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva

Paso 4. Agregar el bloque PID discreto.

A continuación, se debe añadir el bloque PID discreto, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia. Posterior se cierra el circuito creando el controlador PID para el eje X en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

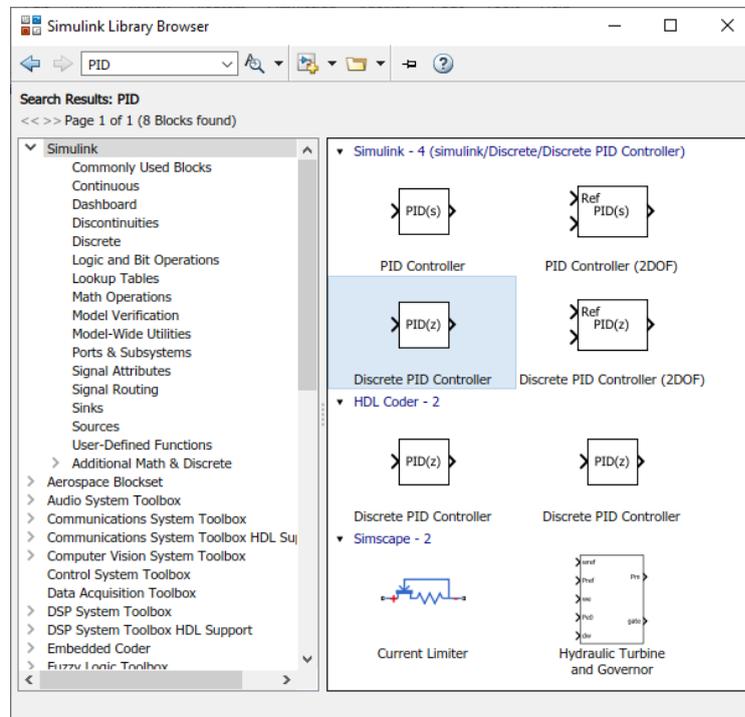


Figura 4. 54: Bloque “Discrete PID Controller”.

Se añade el bloque constante para la referencia y se cierra el lazo con la salida del bloque “Kalman Filter”.

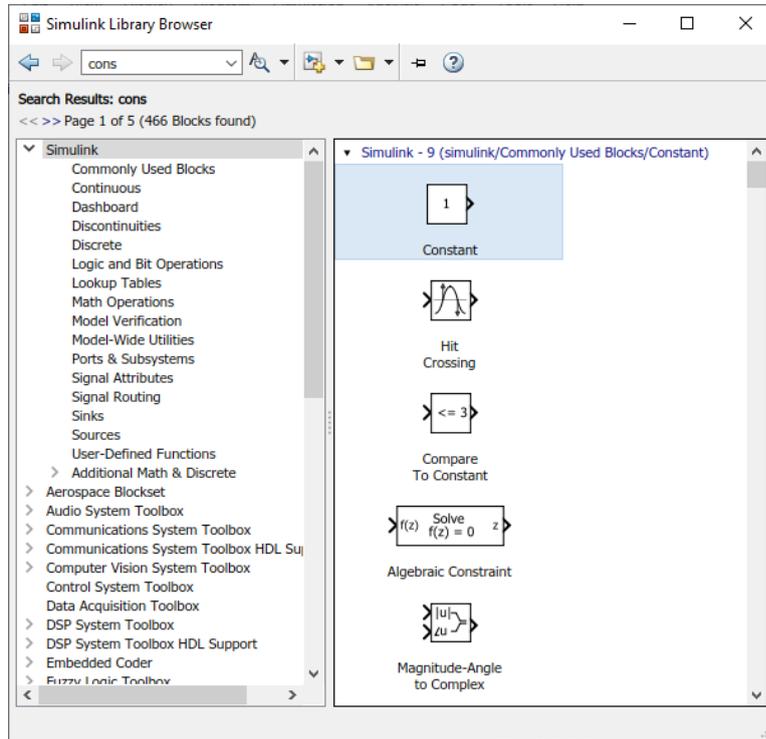


Figura 4. 55: Bloque “Constant” para la referencia del controlador PID.

A continuación, se muestra el algoritmo de control PID para el eje X y se modifican los parámetros del PID.

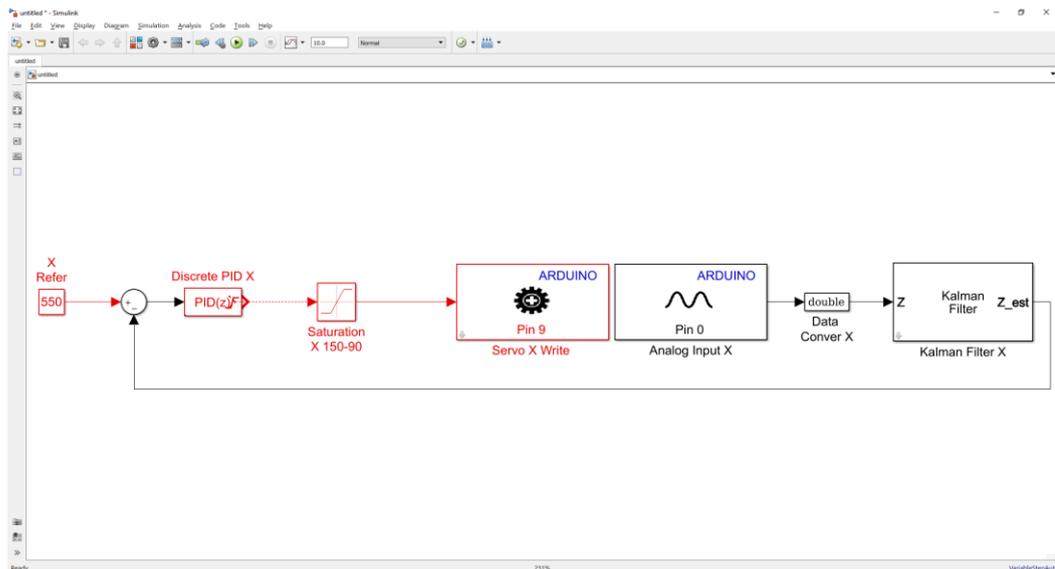


Figura 4. 56: Algoritmo de control PID para el eje X.

Se procede a modificar los valores del bloque “Discrete PID”.

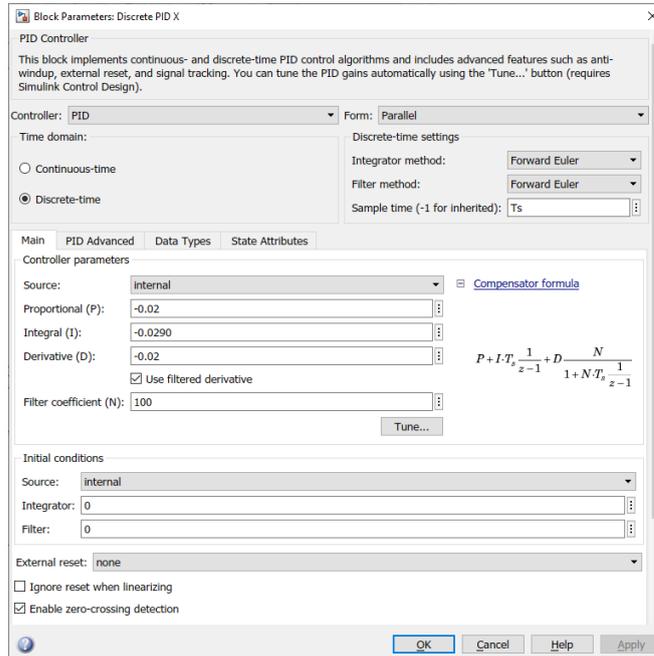


Figura 4. 57: Parametrización del bloque PID para el eje X.

Paso 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda del bloque “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink.

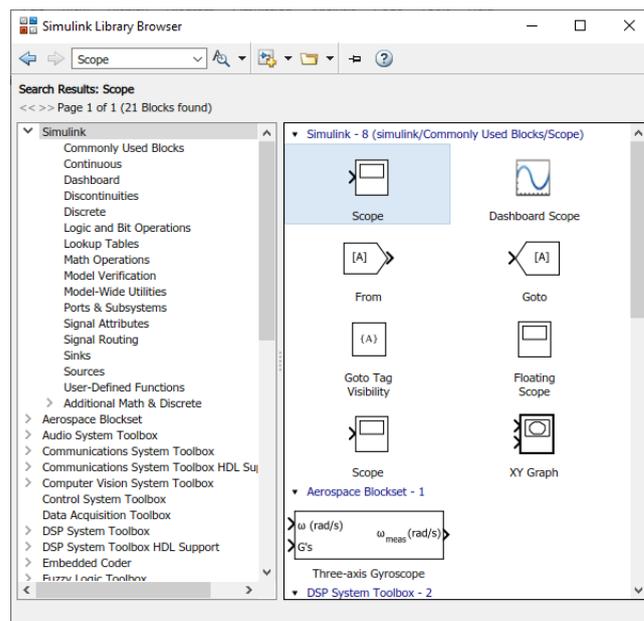


Figura 4. 58: Bloque “Scope” para el eje X.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje X.

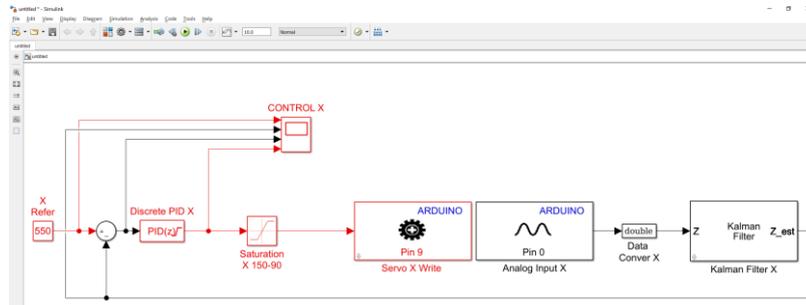


Figura 4. 59: Algoritmo de control PID para el eje X con el bloque “SCOPE”.

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |
    
```

Figura 4. 60: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje de las X es de 550.

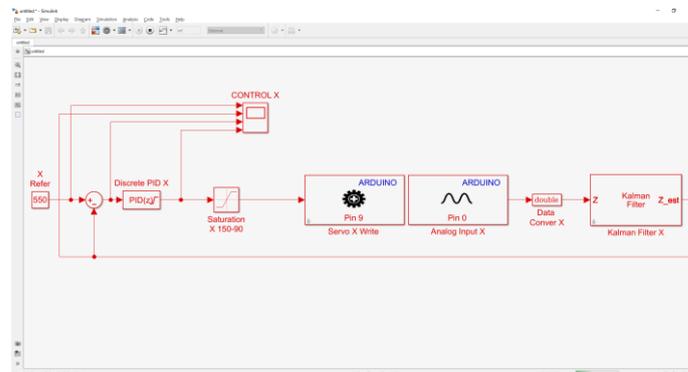


Figura 4. 61: Algoritmo de control PID para el eje X en tiempo real.



Figura 4. 62: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje X.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control PID para el eje X.

Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema

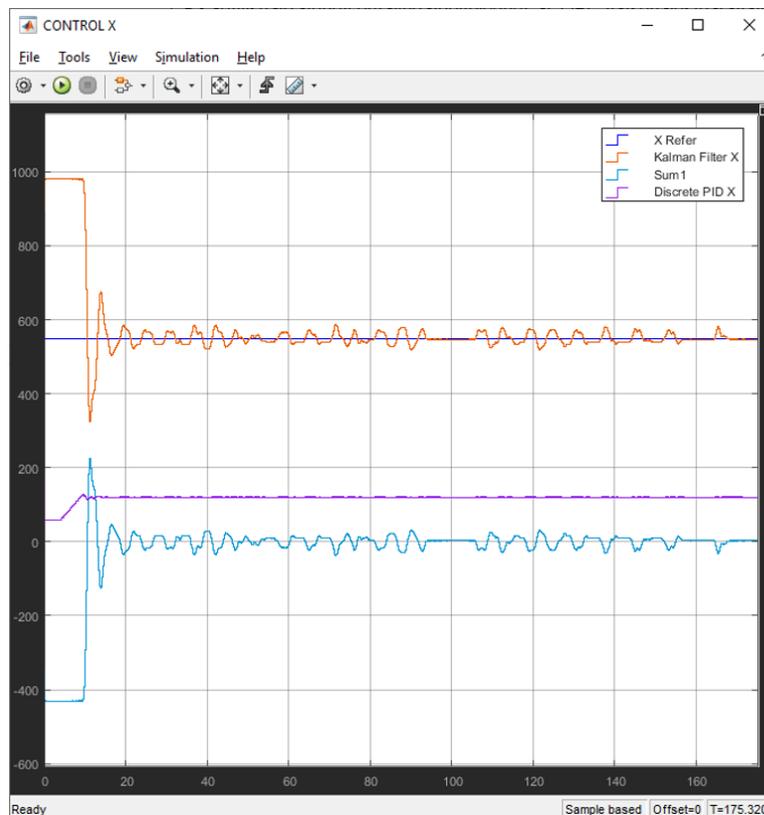


Figura 4. 63: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje X.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-X de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink utilizando el algoritmo de control PID
- Se configura el bloque PID para el eje X y se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul que se muestra en la figura 4.63.

4.5 PRÁCTICA # 5

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control II	
NRO. PRÁCTICA:	5	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL PID PARA EL EJE Y.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Creación de un controlador PID para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque PID y sus atributos. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del PID en el eje Y a la plataforma inercial de 2-GDL. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control PID para el eje Y de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia. 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato. 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE. 4. Agregar el bloque PID discreto. 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas. 			

Paso 1. Creación del algoritmo de control PID para el eje Y de la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización del objeto en la referencia.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos y el bloque “Analog Input” desde la librería de Simulink.

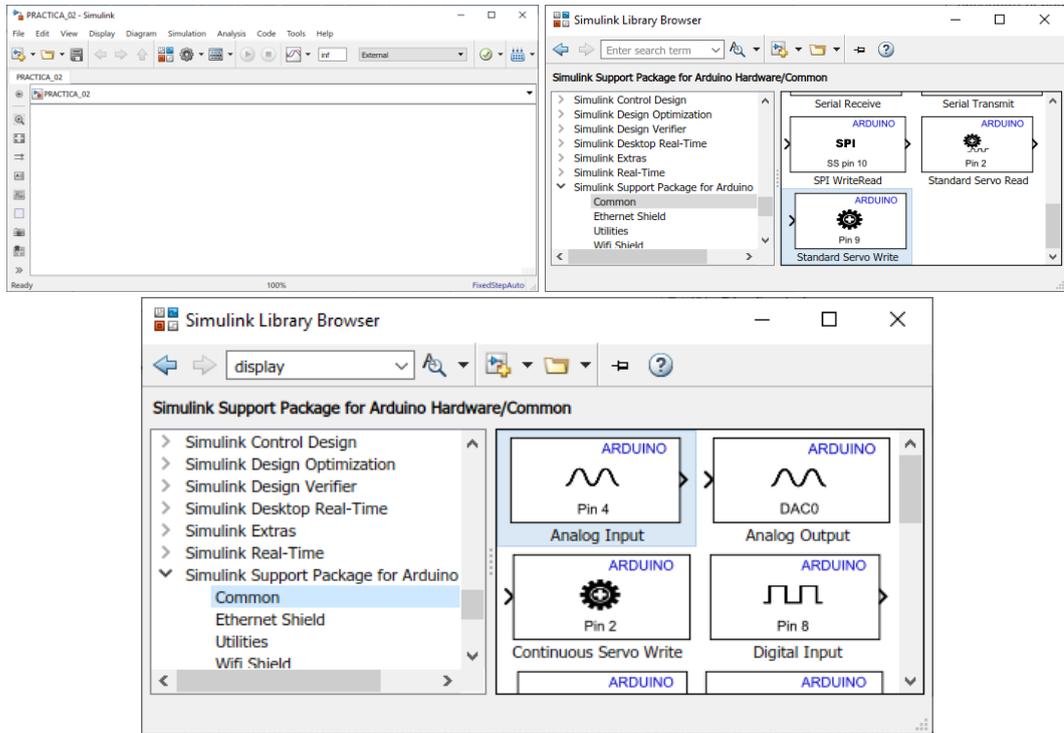


Figura 4. 64: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede a añadir el bloque DATA CONVERT a la salida del bloque de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico.

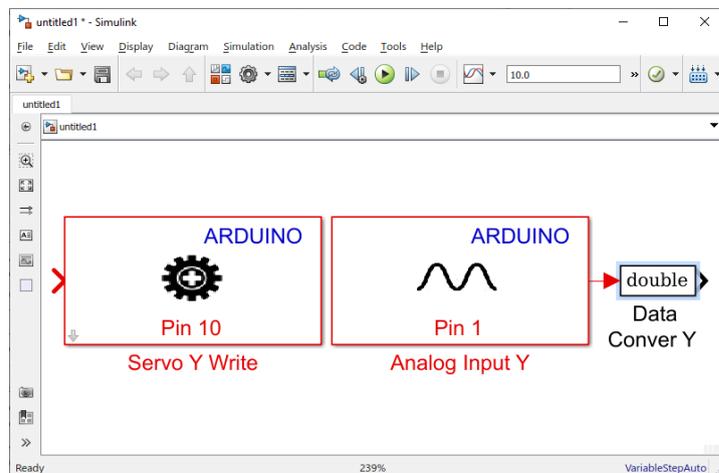


Figura 4. 65: Bloque “Data conver Y” con la variable “doblé”.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Se agrega el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.



Figura 4. 66: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-Y trabaja de 20° a 80° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

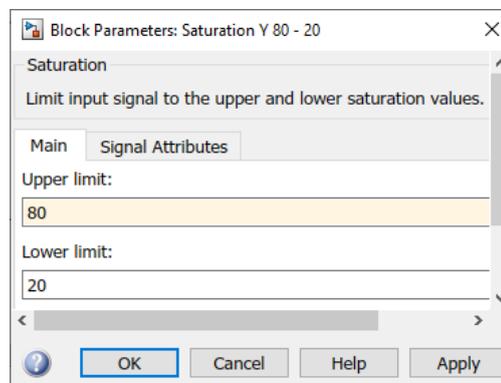


Figura 4. 67: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation”

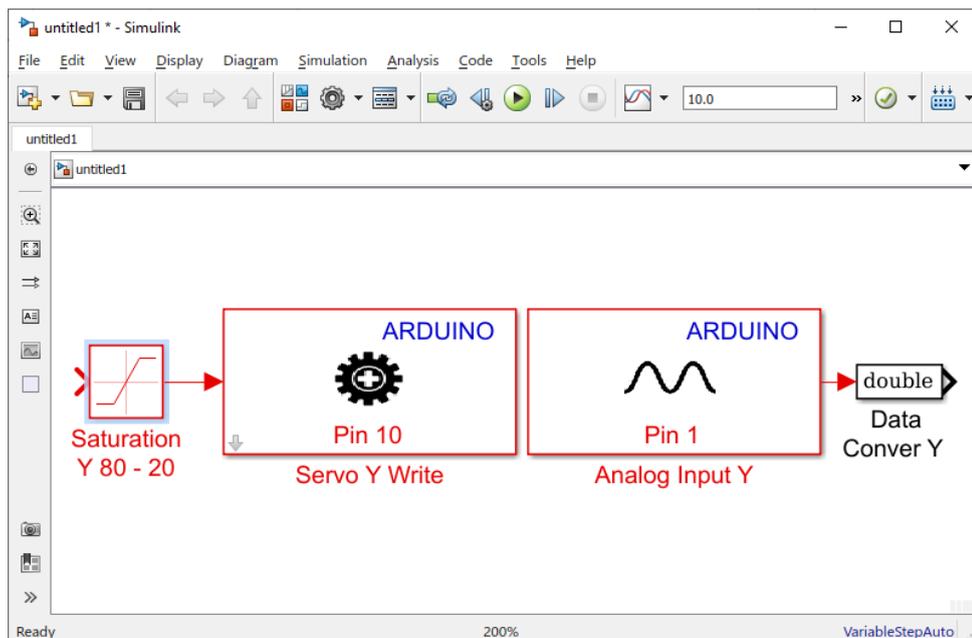


Figura 4. 68: Bloque de saturación para el servomotor Y.

Paso 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida del bloque Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir el bloque “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

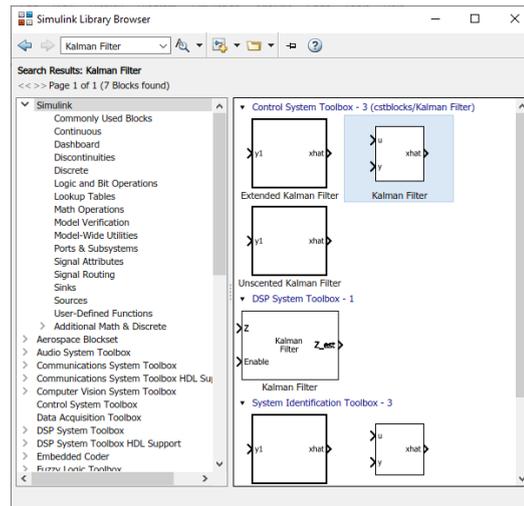


Figura 4. 69: Bloque “Kalman Filter” en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

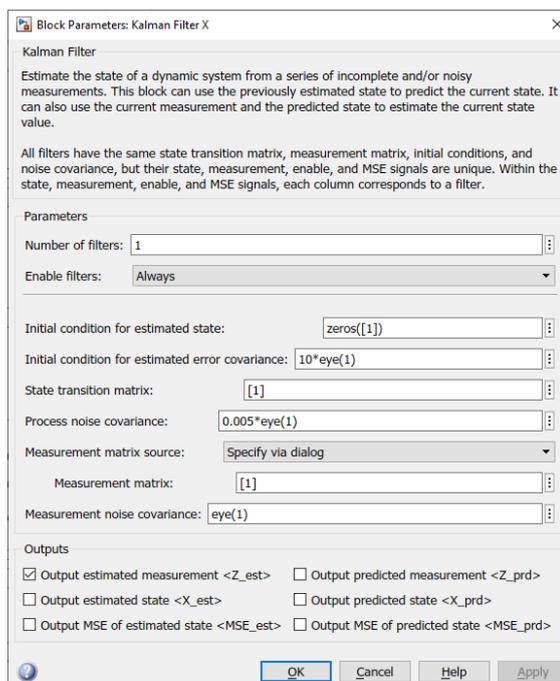


Figura 4. 70: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control PID para el eje Y.

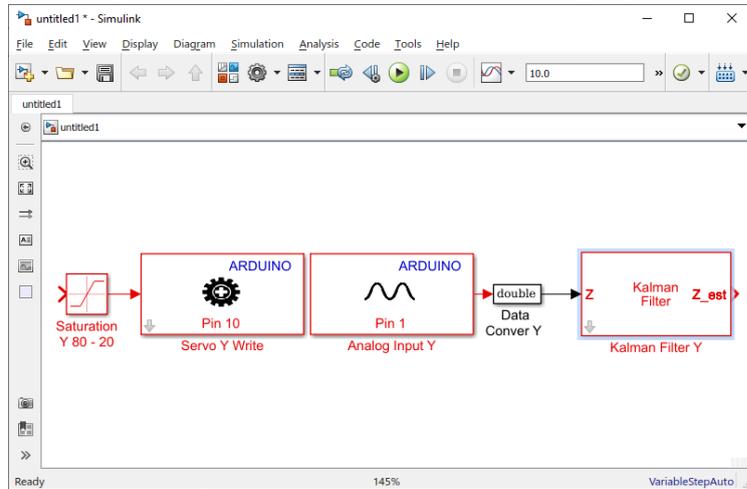


Figura 4. 71: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.

Paso 4. Agregar el bloque PID discreto.

A continuación, se debe añadir el bloque PID discreto, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia. Posterior se cierra el circuito creando el controlador PID para el eje Y en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

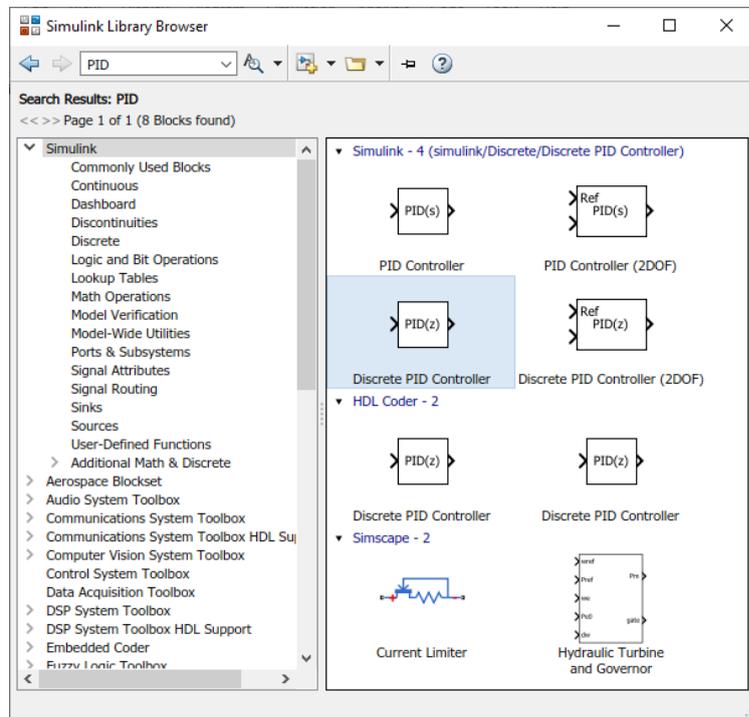


Figura 4. 72: Bloque “Discrete PID Controller”.

Se añade el bloque constante para la referencia y se cierra el lazo con la salida del bloque “Kalman Filter”.

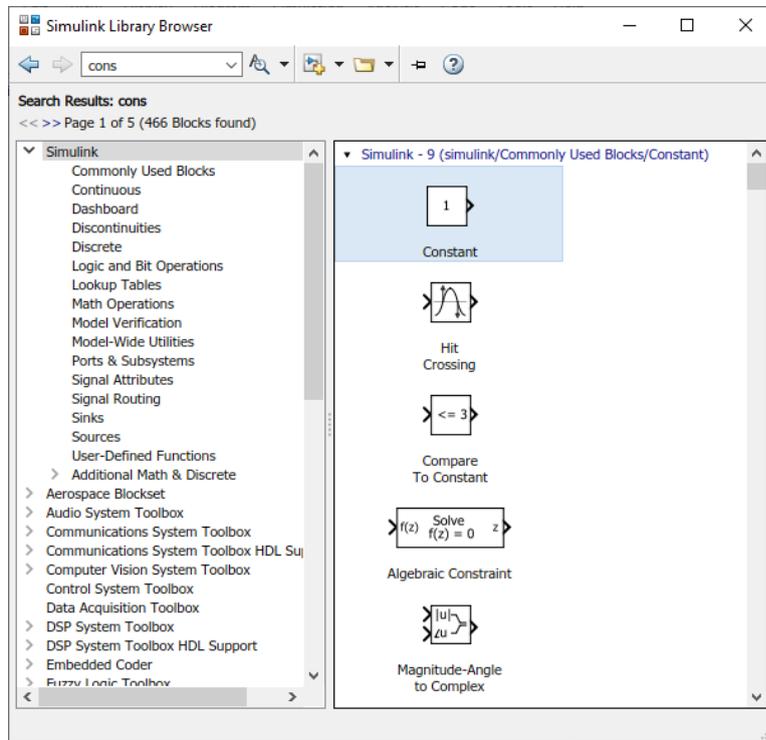


Figura 4. 73: Bloque “Constan” para la referencia del controlador PID.

A continuación, se muestra el algoritmo de control PID para el eje Y y se modifican los parámetros del PID.

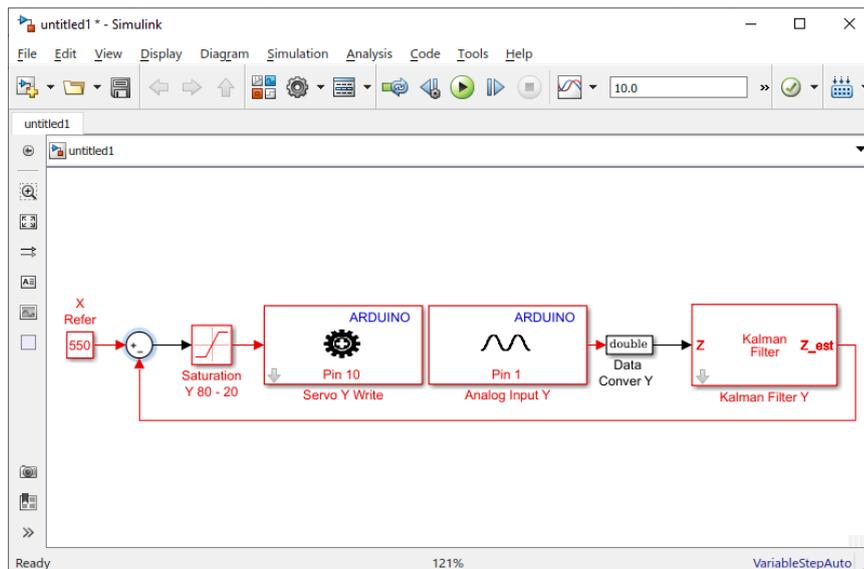


Figura 4. 74: Algoritmo de control PID para el eje Y.

Se procede a modificar los valores del bloque “Discrete PID”.

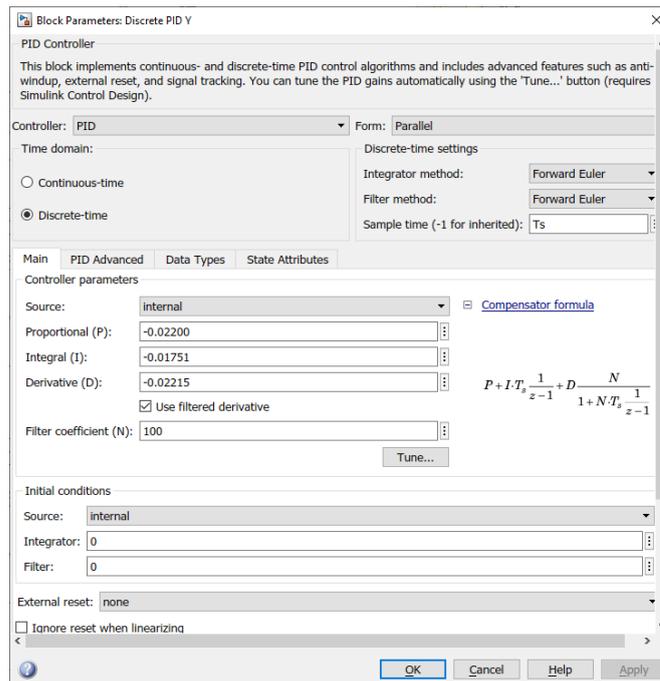


Figura 4. 75: Parametrización del bloque PID para el eje Y.

Paso 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda del bloque “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink.

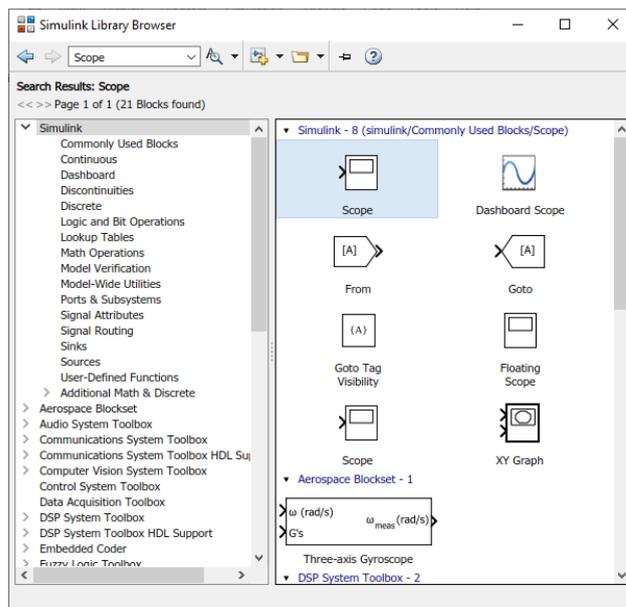


Figura 4. 76: Bloque “Scope” para el eje Y.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje Y.

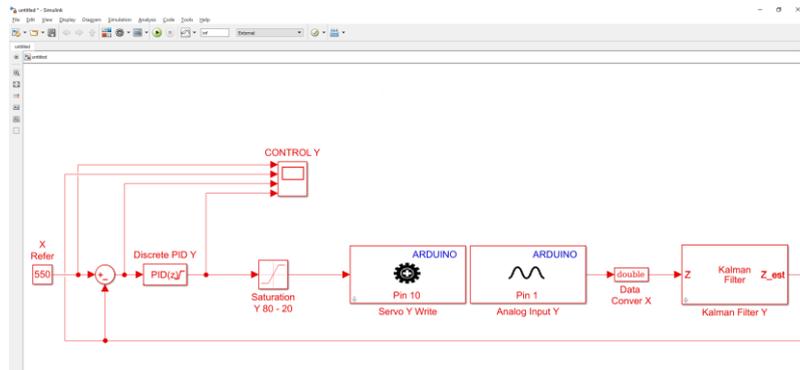


Figura 4. 77: Algoritmo de control PID para el eje Y con el bloque “SCOPE”.

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |
    
```

Figura 4. 78: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje Y es de 550.

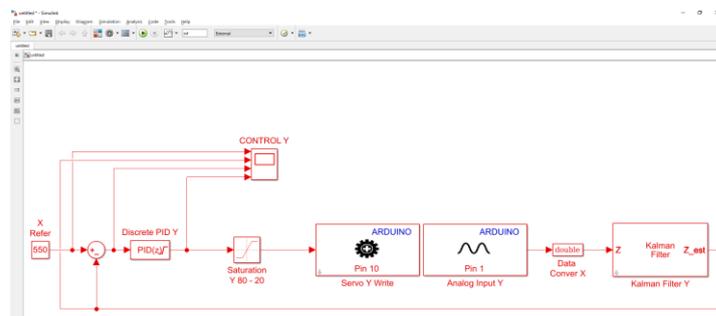


Figura 4. 79: Algoritmo de control PID para el eje Y en tiempo real.



Figura 4. 80: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje de las Y.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control PID para el eje Y.

Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema

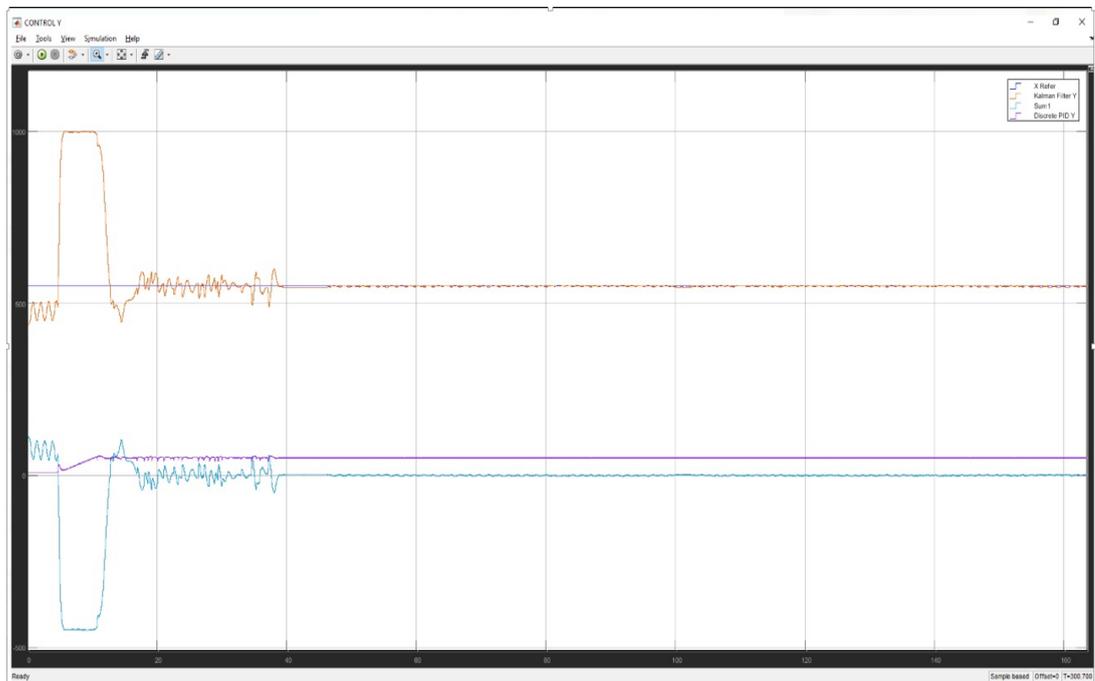


Figura 4. 81: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje Y

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-Y de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink utilizando el algoritmo de control PID
- Se configura el bloque PID para el eje Y y se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul.

4.6 PRÁCTICA # 6

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control III	
NRO. PRÁCTICA:	6	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL PID PARA LA PLATAFORMA INERCIAL DE 2-GDL.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Crear un controlador PID para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque PID y sus atributos para ambos ejes de libertad. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble para los ejes X y Y. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva para los ejes X y Y. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del PID para la plataforma inercial de 2-GDL. • Diseñar una trayectoria circular para que la esfera lo siga indefinidamente. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control PID para la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia que se establece en el eje X y Y. 			

2. Agregar los bloques de saturación para limitar el movimiento angular del plato para los ejes X y Y.
3. Agregar los bloques de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva de los ejes X y Y por el Arduino DUE.
4. Agregar los bloques PID discreto.
5. Agrega dos bloques para el diseño de la señal circular de la trayectoria que la esfera sigue indefinidamente
6. Agregar los bloques “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Paso 1. Creación del algoritmo de control PID para la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia que se establece en el eje X y Y.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega dos bloques de escritura estándar para servos y dos bloques “Analog Input” desde la librería de Simulink.

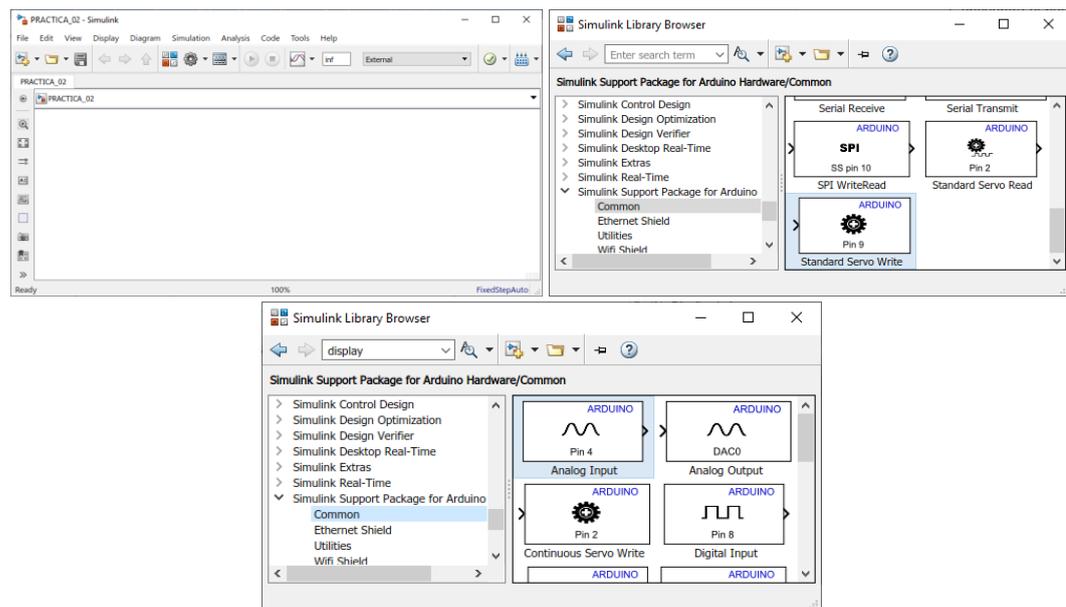


Figura 4. 82: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede añadir los bloques DATA CONVERT a la salida de los bloques de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico.

A continuación de muestra los bloques creados en Simulink para el proceso de la práctica en mención.

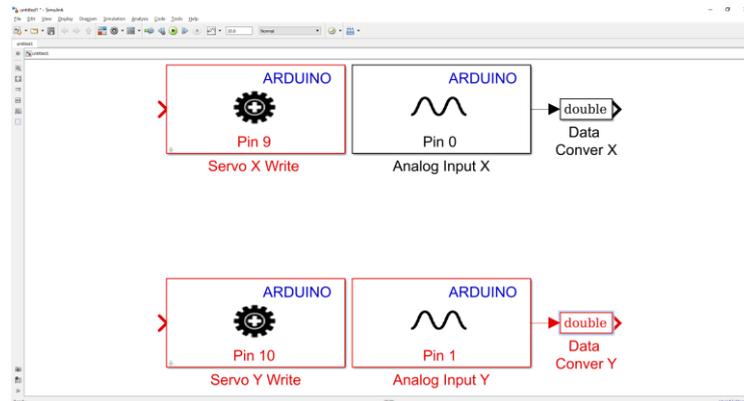


Figura 4. 83: Bloque “Data conver” con la variable “doublé”.

Paso 2. Agregar los bloques de saturación para limitar el movimiento angular del plato para los ejes X y Y.

Se agrega dos bloques de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que los servomotores se deben mover.



Figura 4. 84: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-X trabaja de 90 A 150 y el motor-Y trabaja de 20° a 80° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

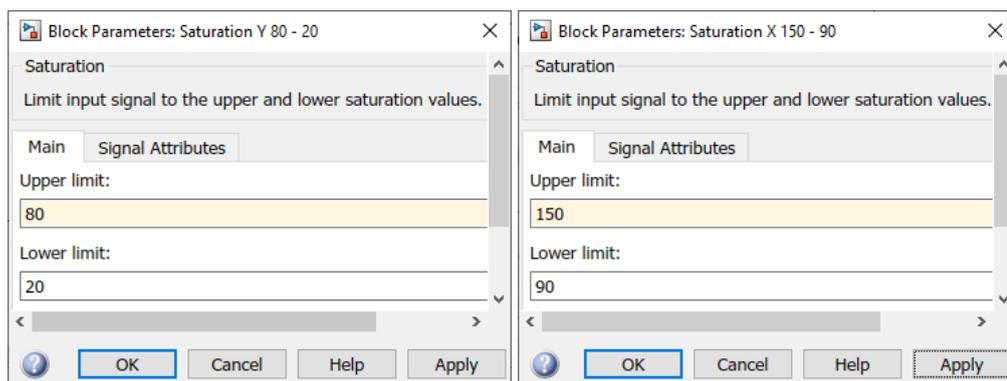


Figura 4. 85: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation” en el entorno de Simulink.

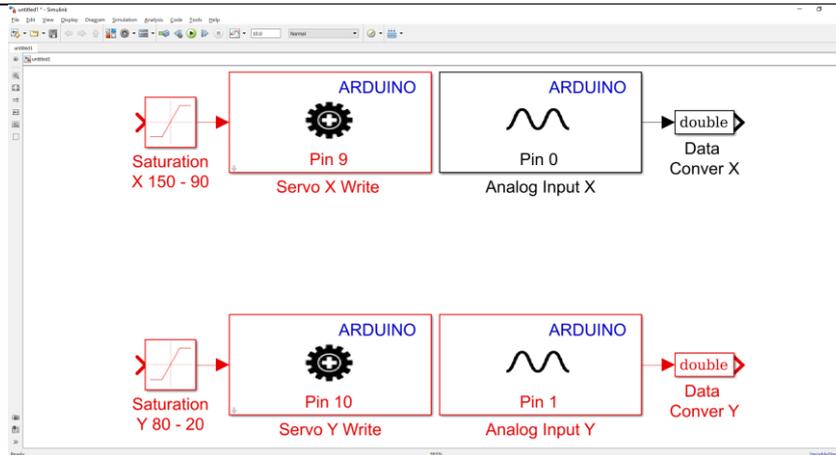


Figura 4. 86: Bloque de saturación para los servomotores X y Y.

Paso 3. Agregar los bloques de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva de los ejes X y Y por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida de los bloques Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir dos bloques “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

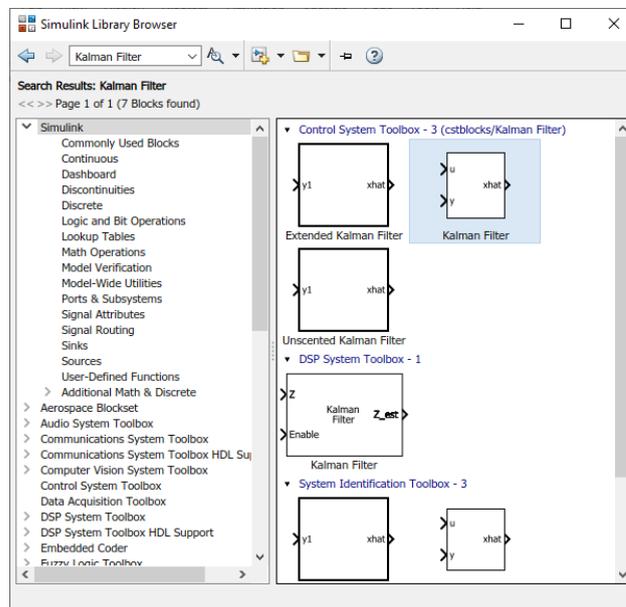


Figura 4. 87: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

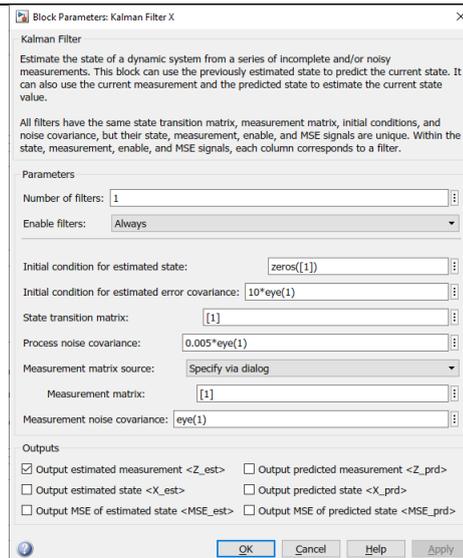


Figura 4. 88: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.

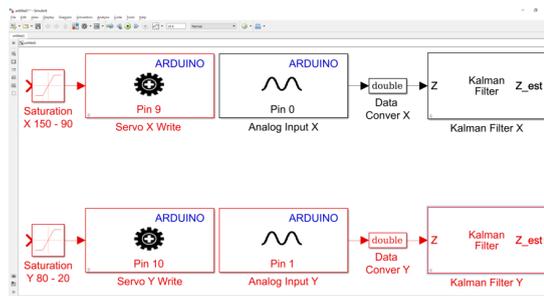


Figura 4. 89: Filtrado de las señales de la pantalla táctil resistiva.

Paso 4. Agregar los bloques PID discreto.

A continuación, se debe añadir dos bloques PID discreto, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia por cada eje de liberta.

Posterior se cierra el circuito creando el controlador PID para el eje X y Y en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

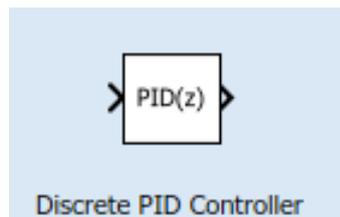


Figura 4. 90: Bloque “Discrete PID Controller”.

Se añade los bloques constantes para las referencias y se cierra el lazo con la salida de los bloques “Kalman Filter” del eje X y Y.

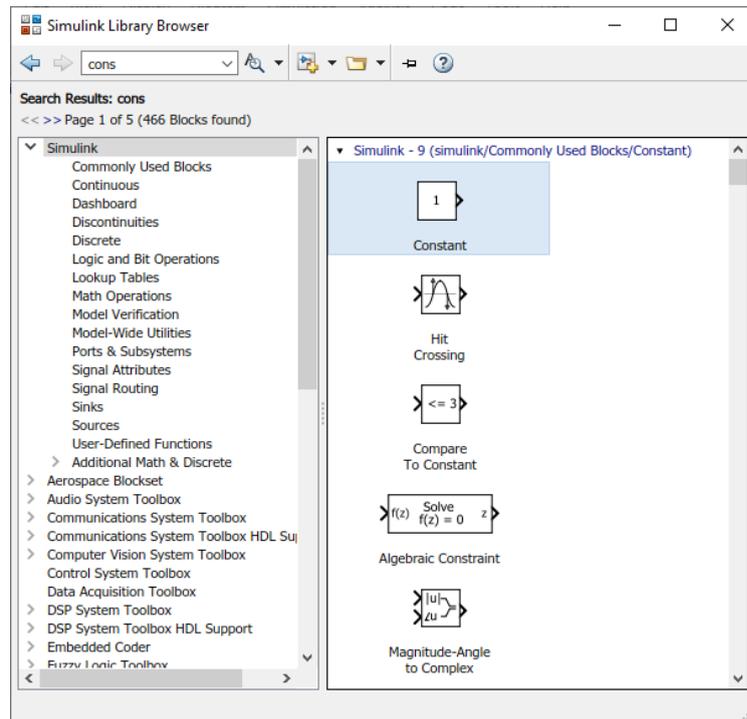


Figura 4. 91: Bloque “Constant” para la referencia del controlador PID.

A continuación, se muestra el algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL y se modifican los parámetros del PID.

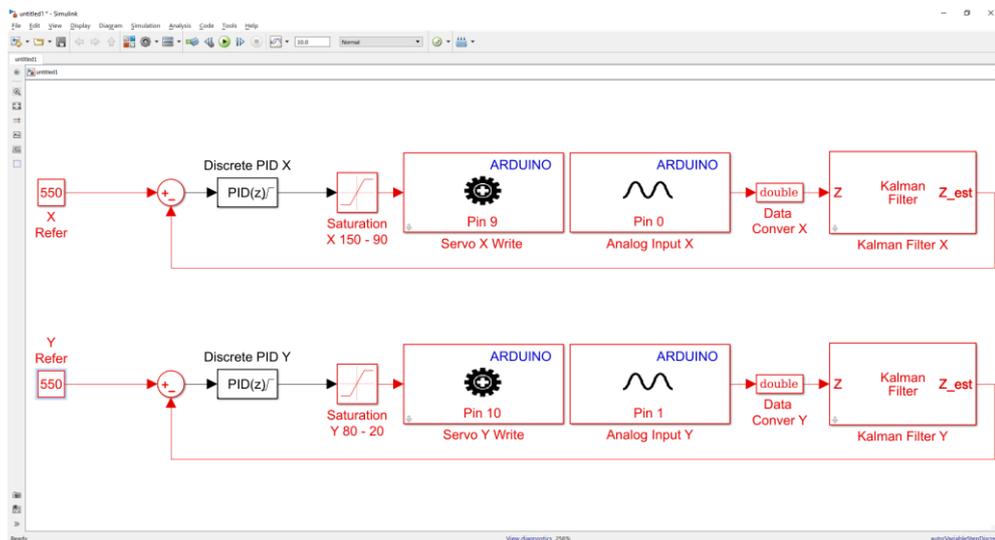


Figura 4. 92: Algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.

Se procede a modificar los valores del bloque “Discrete PID”.

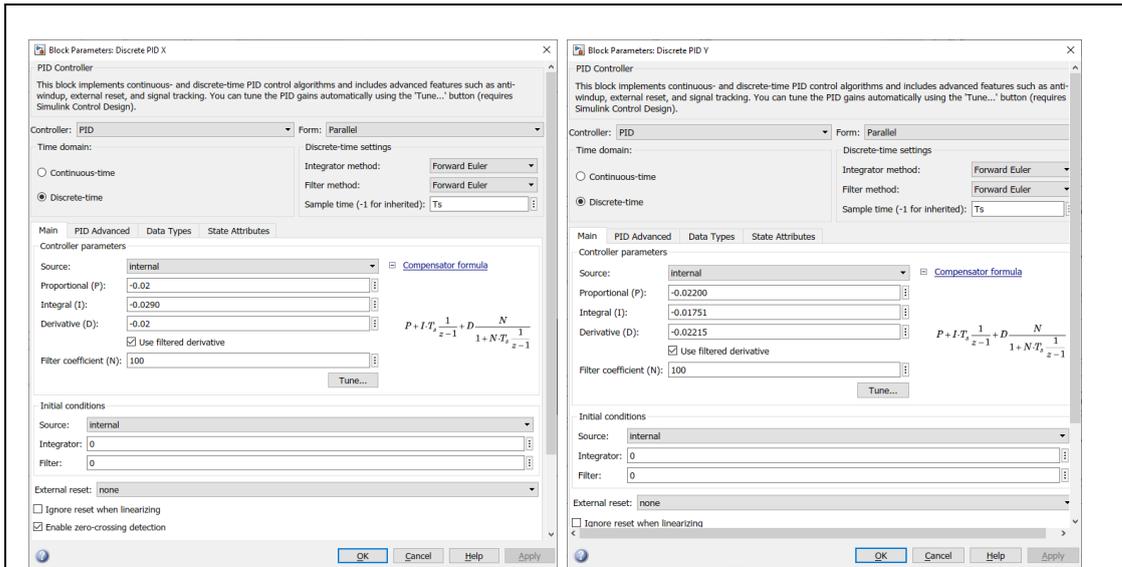


Figura 4. 93: Parametrización del bloque PID para el eje X y Y.

Paso 5. Agrega dos bloques para el diseño de la señal circular de la trayectoria que la esfera sigue indefinidamente

Para el seguimiento de la trayectoria circular de la esfera se crea 2 bloques “Sine Wave” para el eje X y Y que se encuentra en la librería de Simulink, se crean dos señales sinusoidales con un desfase de $\pi/2$ para la creación de la señal circular que esfera sigue sobre la pantalla fácil resistiva.

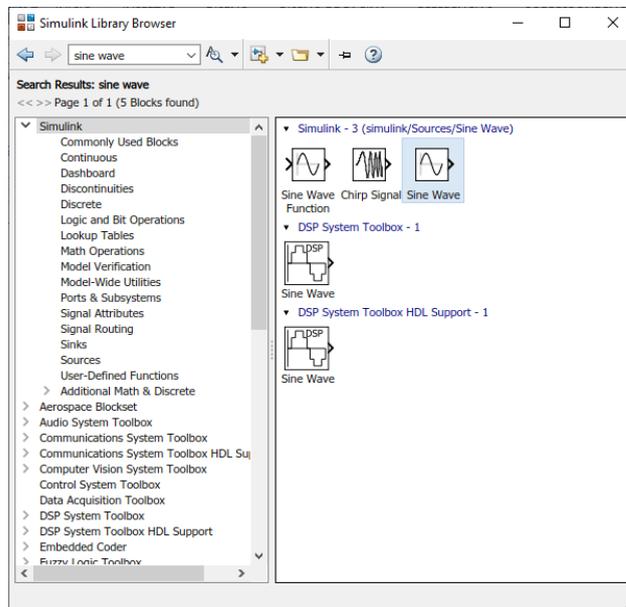


Figura 4. 94: Bloque “Sine Wave” para la creación de la señal circular

Se parametriza los dos bloques “Sine Wave” para la creación de la señal circular que se envían como referencia a la entrada del bloque PID para el eje X y Y.

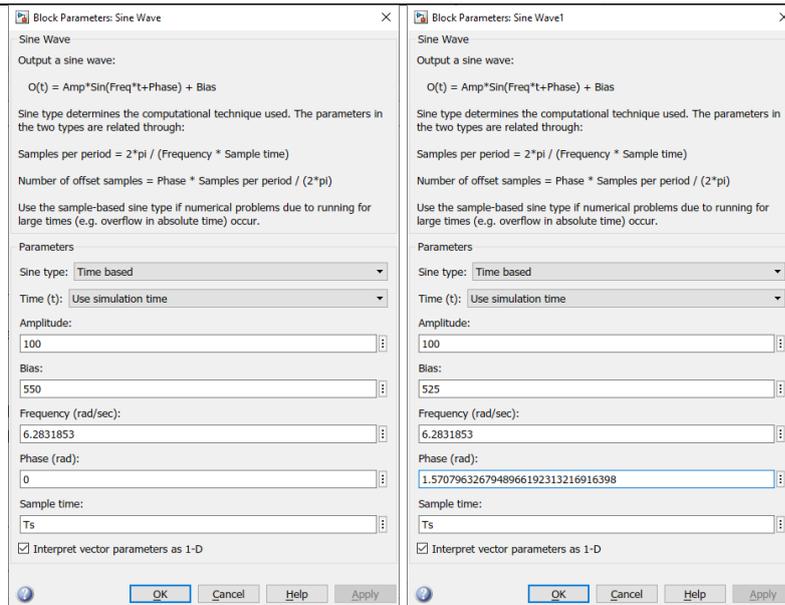


Figura 4. 95: Parametrización de los bloques “Sine Wave”

A continuación, se muestra el algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.

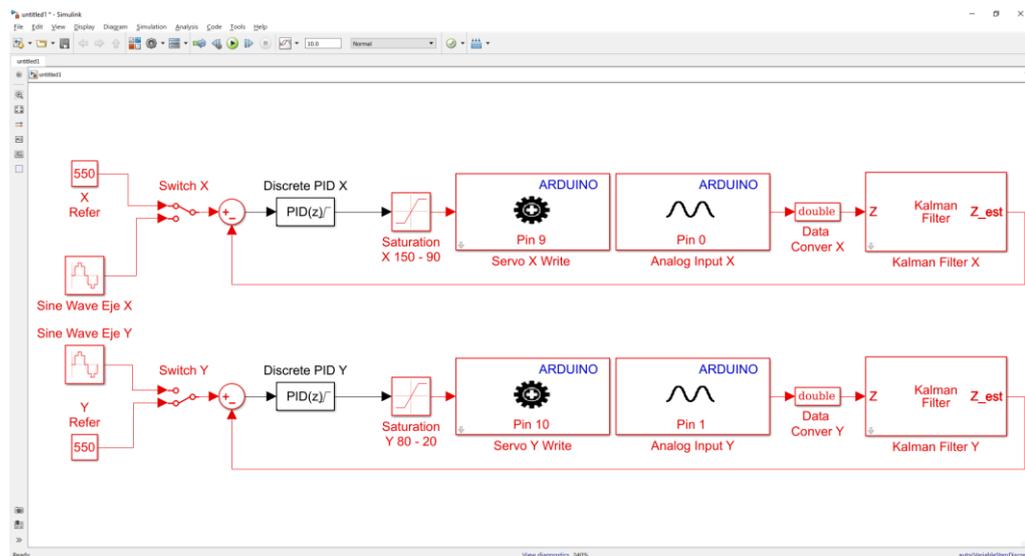


Figura 4. 96: Algoritmo de control PID para la plataforma inercial de 2-GDL.

Paso 6. Agregar dos bloques “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda de dos bloques “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink.



Figura 4. 97: Bloques “Scope” para el eje X y Y.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje X y Y.

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |
```

Figura 4. 98: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje de las X y Y es de 550.

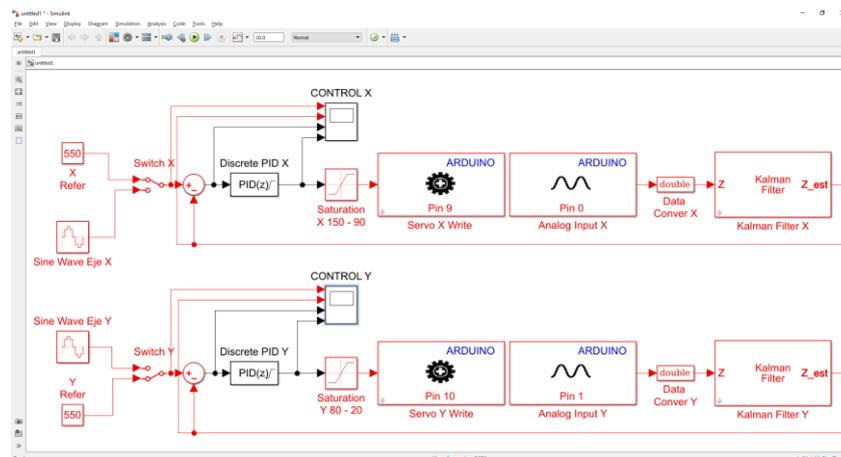


Figura 4. 99: Algoritmo de control PID para el eje de las X y Y en tiempo real.



Figura 4. 100: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje de las X y Y.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control PID para el eje de las X y Y.

Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema.

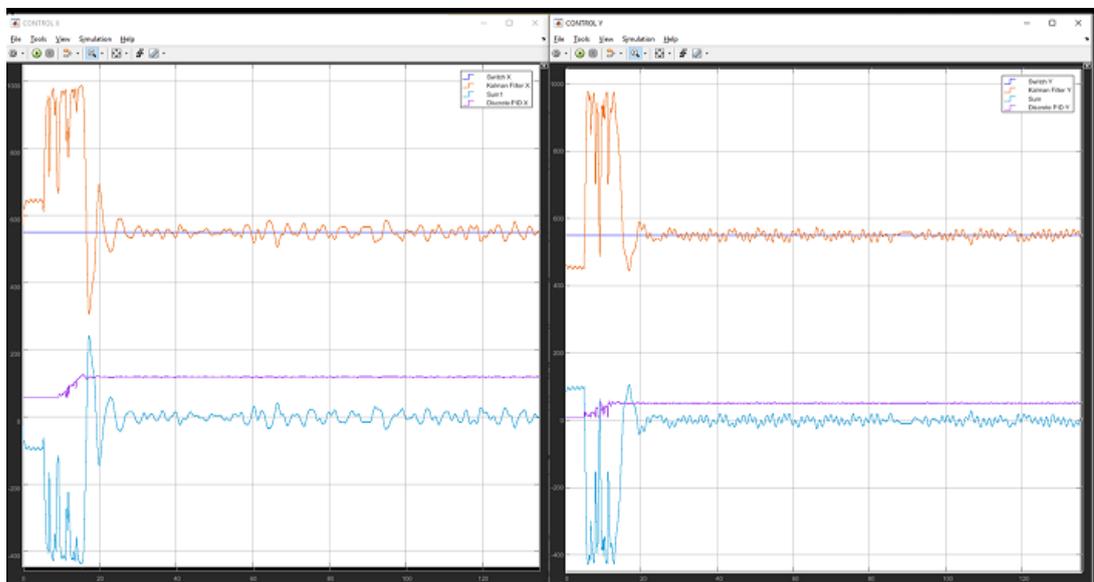


Figura 4. 101: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.

Se comprueba el seguimiento de la esfera de la trayectoria circular sobre el plato, a continuación, se muestra la evidencia del seguimiento de la trayectoria.

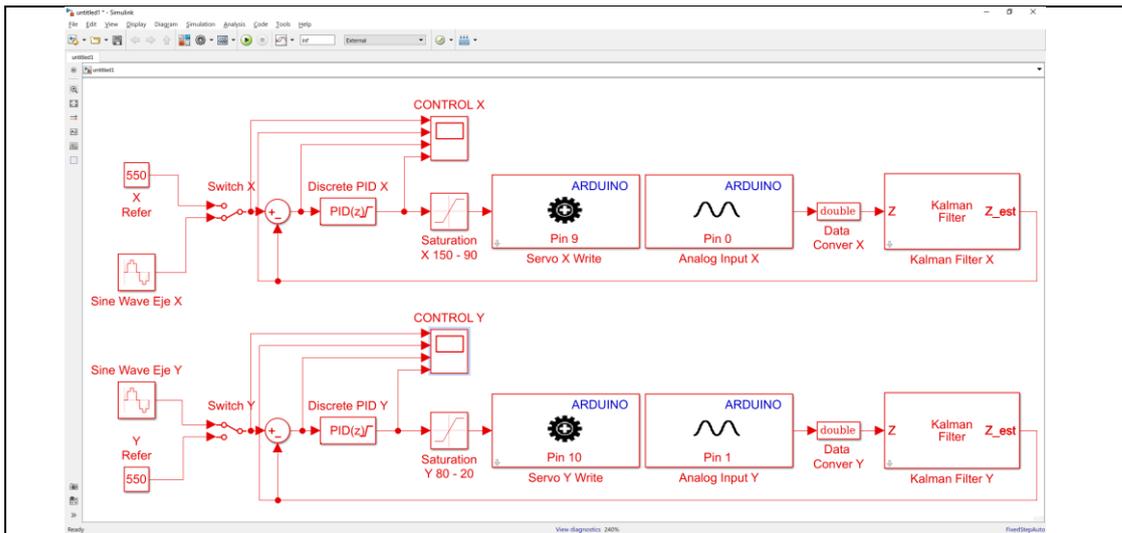


Figura 4. 102: Algoritmo de control PID para el seguimiento de trayectoria.

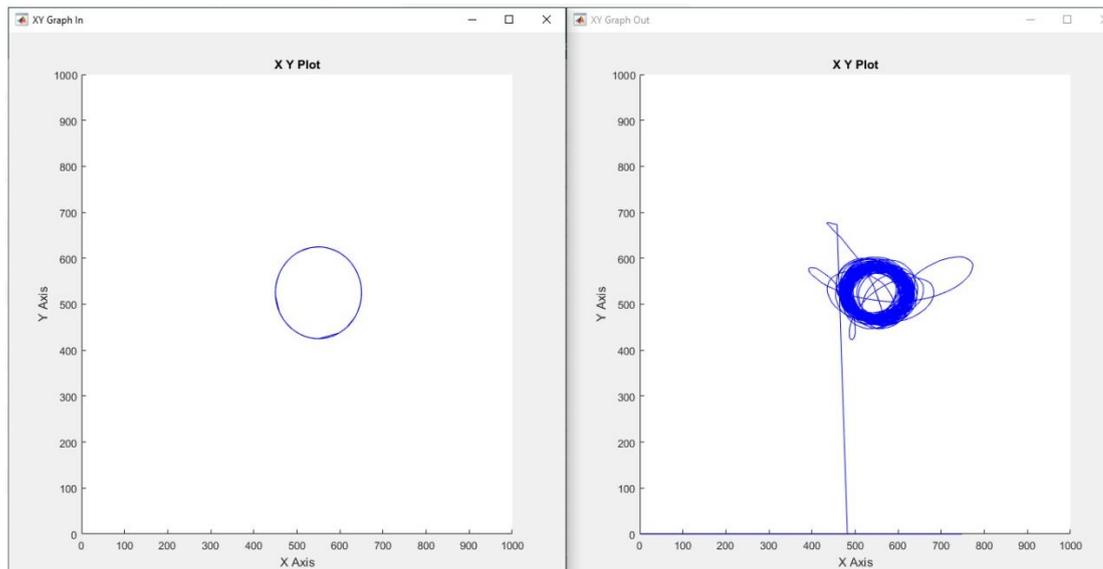


Figura 4. 103: Grafica del seguimiento de la esfera.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control PID para el seguimiento de la esfera de la señal generada.

Donde la señal de color amarillo es la señal circular generada que ingresa al sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema.

Se muestra el correcto funcionamiento del controlador siguiendo la señal sinusoidal

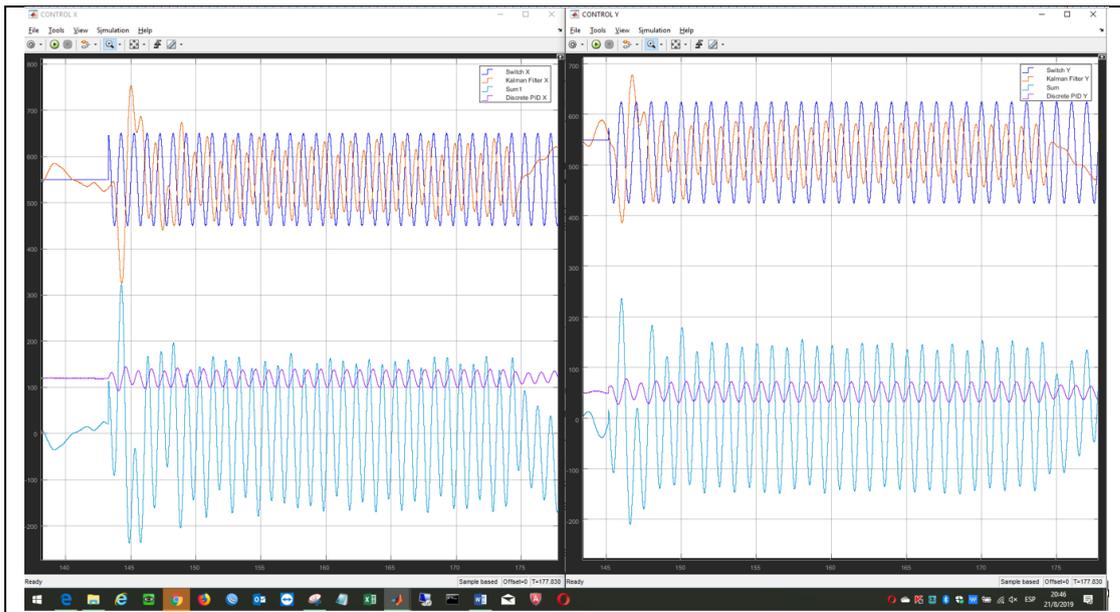


Figura 4. 104: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con la planta didáctica y el software Matlab/Simulink.
- Se configura el bloque PID para el eje de las X y Y, se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul.
- Se realiza con éxitos el seguimiento de la esfera de la señal circular.

4.7 PRÁCTICA # 7

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control II	
NRO. PRÁCTICA:	7	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL FUZZY PARA EL EJE X.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Creación de un controlador FUZZY para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque FUZZY y sus atributos. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del FUZZY en el eje X a la plataforma inercial de 2-GDL. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para el eje X de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia. 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato. 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE. 4. Agregar el bloque FUZZY Logic Controller. 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas. 			

Paso 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para el eje X de la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización del objeto en la referencia.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos y el bloque “Analog Input” desde la librería de Simulink.

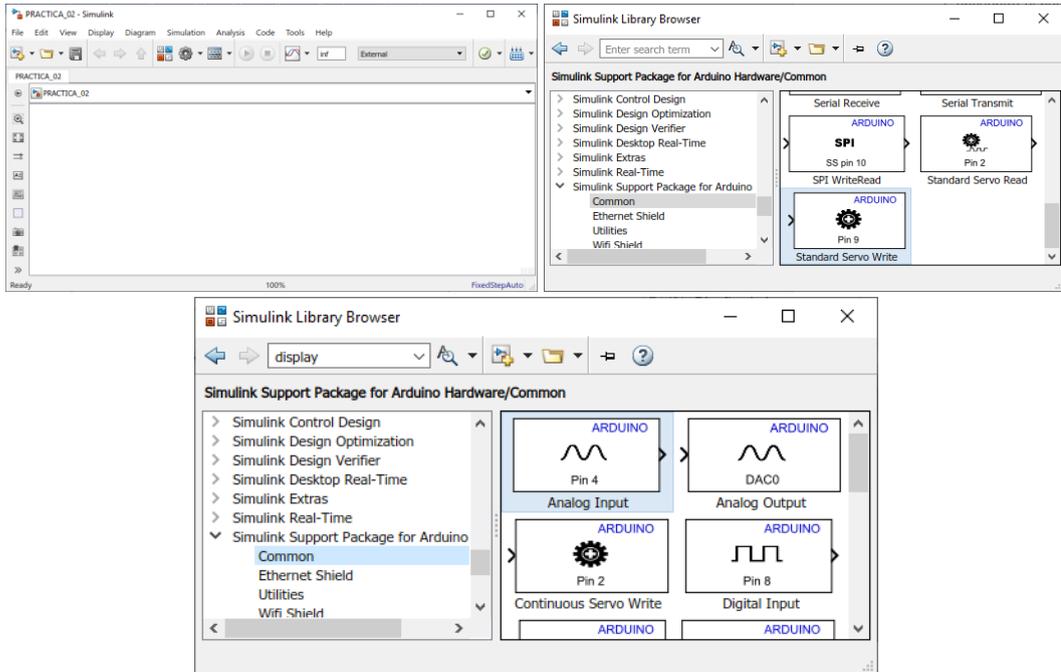


Figura 4. 105: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede añadir el bloque DATA CONVERT a la salida del bloque de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico,

Esos bloques son exportados a Simulink

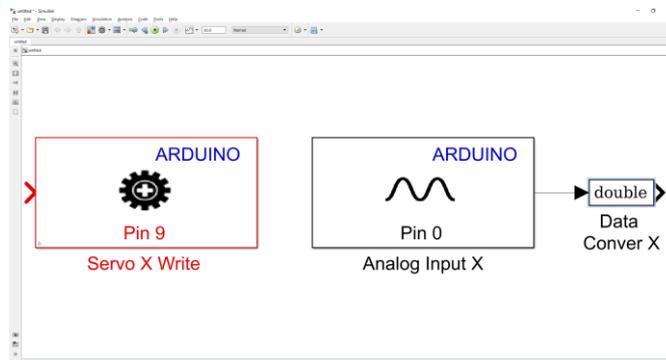


Figura 4. 106: Bloque “Data conver X” con la variable “doublé”.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Se agrega el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.



Figura 4. 107: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-Y trabaja de 90° a 150° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

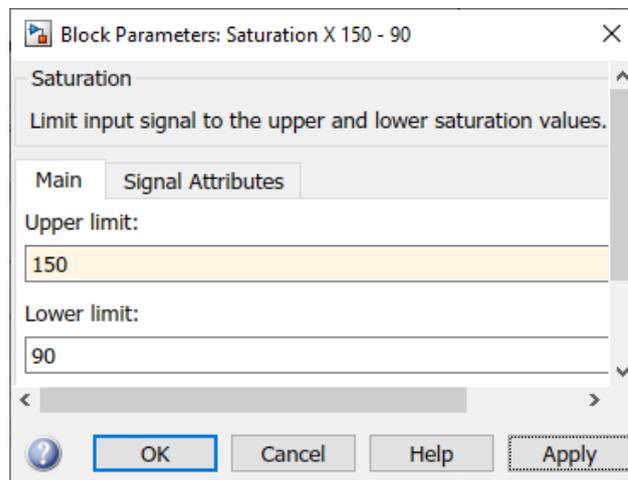


Figura 4. 108: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation” en el ambiente de Simulink para observar el proceso de la práctica que se esta realizando.

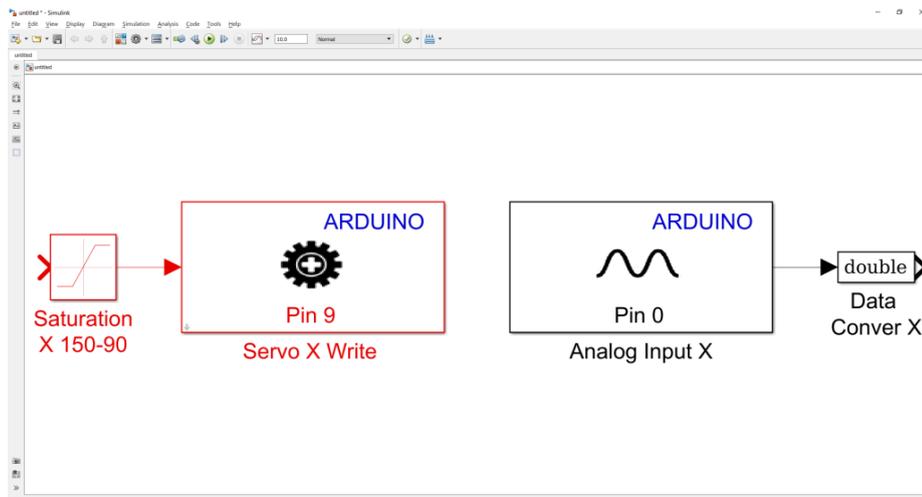


Figura 4. 109: Bloque de saturación para el servomotor X.

Paso 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida del bloque Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir el bloque “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

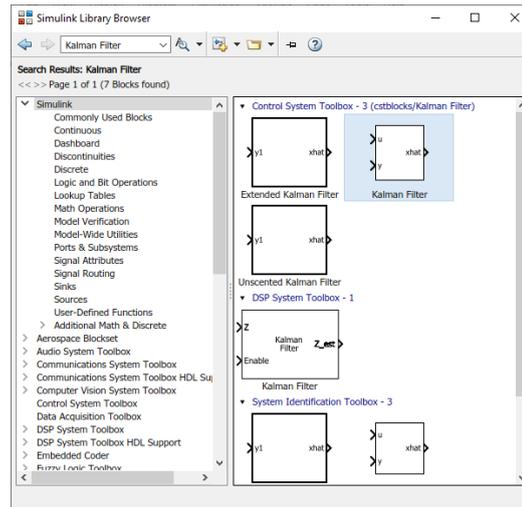


Figura 4. 110: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

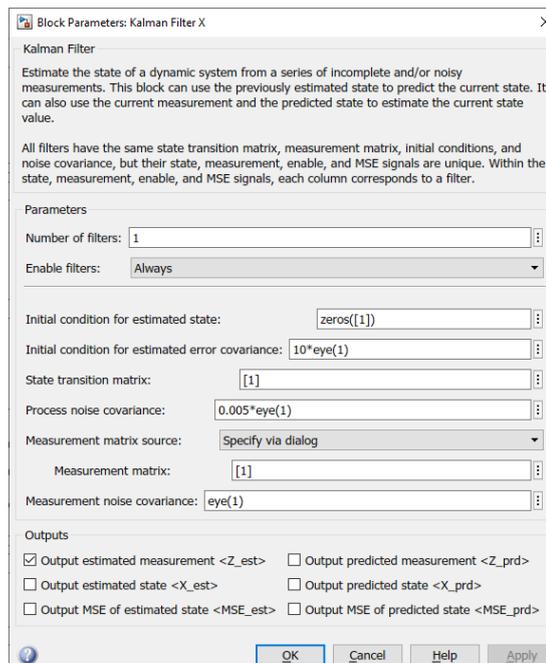


Figura 4. 111: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control FUZZY para el eje X.

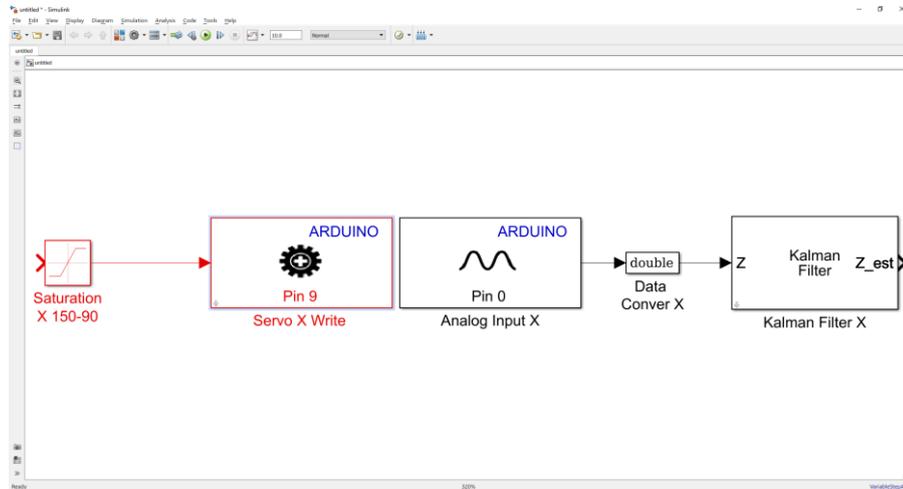


Figura 4. 112: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.

Paso 4. Agregar el bloque FUZZY Logic Controller.

A continuación, se debe añadir el bloque FUZZY, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia. Posterior se cierra el circuito creando el controlador FUZZY para el eje X en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

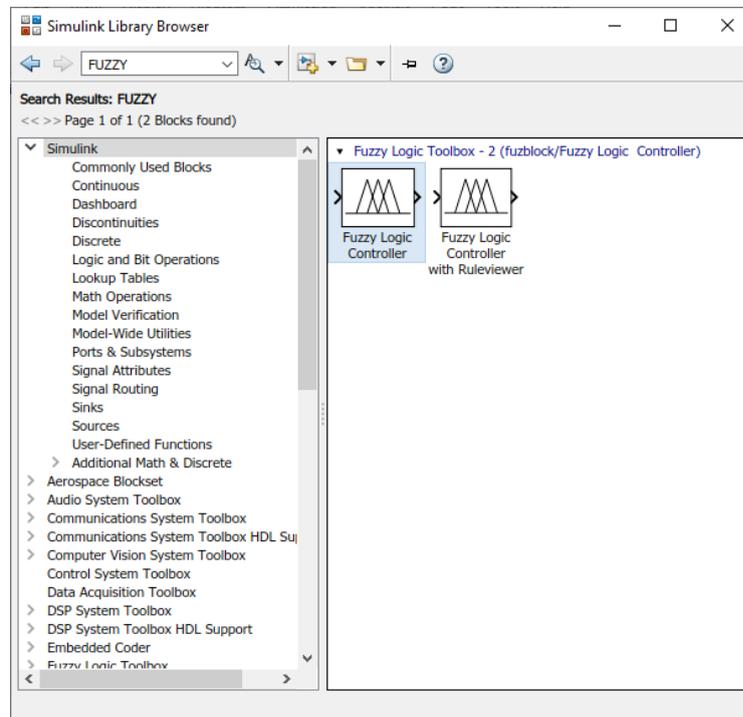


Figura 4. 113: Bloque "FUZZY Logic Controller".

Se añade el bloque constante para la referencia y se cierra el lazo con la salida del bloque “Kalman Filter”.

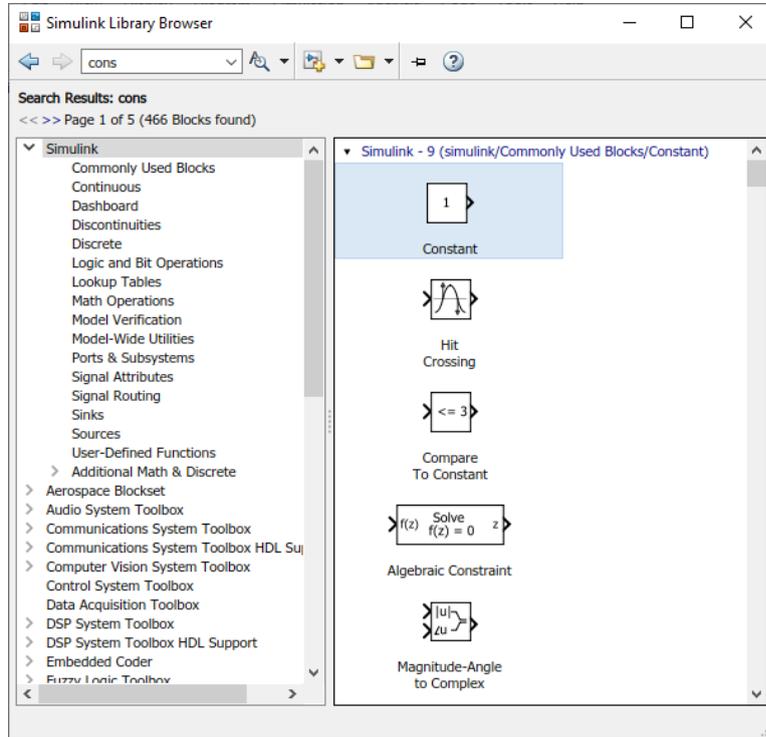


Figura 4. 114: Bloque “Constan” para la referencia del controlador FUZZY.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para el eje X.

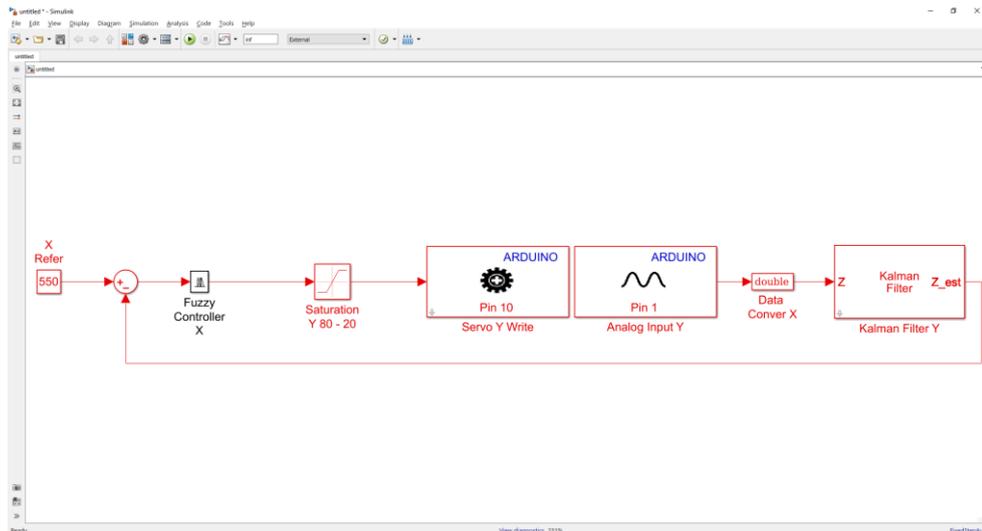


Figura 4. 115: Algoritmo de control PID para el eje X.

Para cumplir con la utilización del control FUZZY se debe crear las variables a utilizar en el bloque de antes mencionado, se escribe en la ventana de comando la palabra “fuzzy” para llamar el toolbox FUZZY.

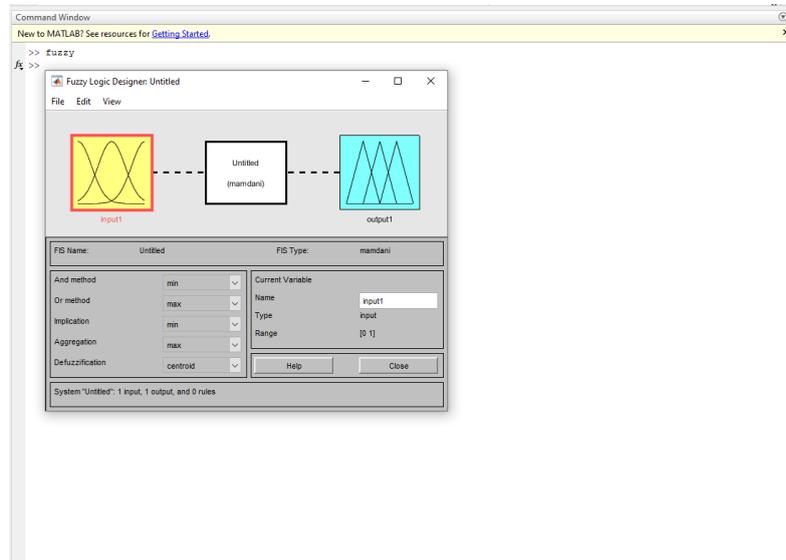


Figura 4. 116: Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.

Para la creación del algoritmo de control se utiliza el método Mamdani.

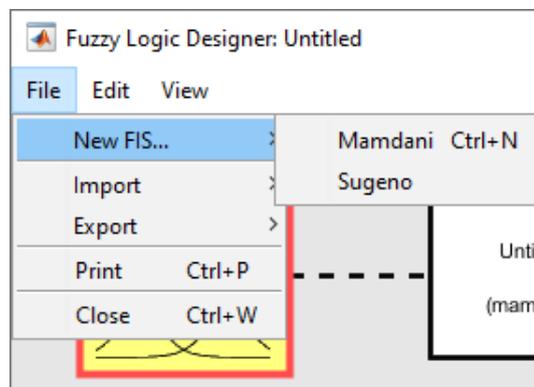


Figura 4. 117: Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.

Se crean dos variables de entrada y una variable de salida.

Variables de entradas:

Error, representa la retroalimentación de error de la plataforma inercial de 2-GDL
D-Error, representa la derivada de error.

La variable de Salida:

Control, representa la señal de control hacia los servomotores que entrega la posición angular del bloque fuzzy.

Se define el nombre del bloque FUZZY para el eje X.

FuzzyX, en el entorno de Simulink al utilizar el bloque fuzzy es necesario nombrar al bloque para la definición, para este caso el fuzzy del eje x se llama FuzzyX.

Se muestra la creación de las variables antes mencionados.

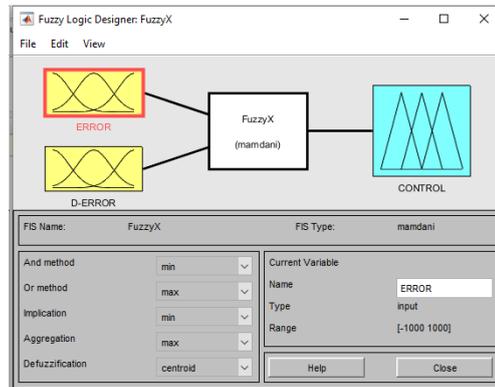


Figura 4. 118: FUZZY para el eje X.

Se debe editar las funciones de membresía de control para las variables de entradas y la variable de salida y se utilizan funciones gaussianas para el diseño del algoritmo FUZZY para el eje X.

Variables de entrada:

Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

D-Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

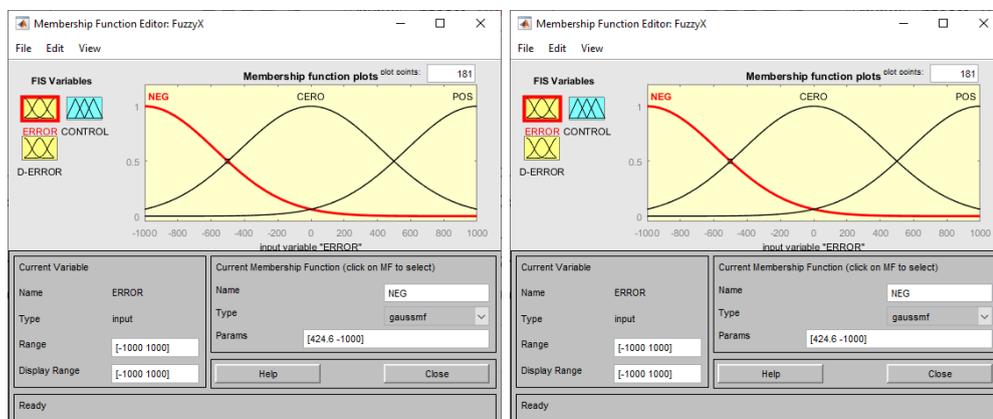


Figura 4. 119: Funciones de membresía para las variables de entrada.

Variable de Salida:

Control, tiene 5 funciones de membresía gaussianas que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 107.5 a 127.5, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de X.

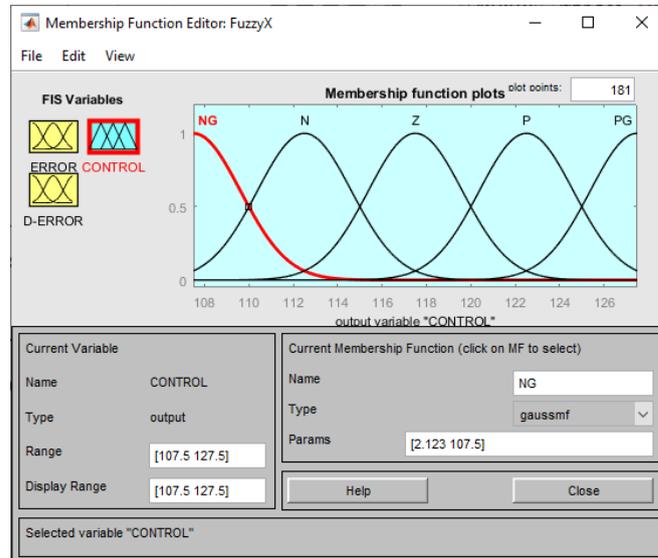


Figura 4. 120: Funciones de membresía para las variables de entrada.

La señal de CONTROL no se realiza ninguna escala a la salida del fuzzy ya que el rango de operación de la señal gaussiana es el rango de operación del movimiento del servomotor en el eje de la X.

Se procede a agregar las reglas en el Toolbox FUZZY de correspondencia para el correcto funcionamiento del controlador.

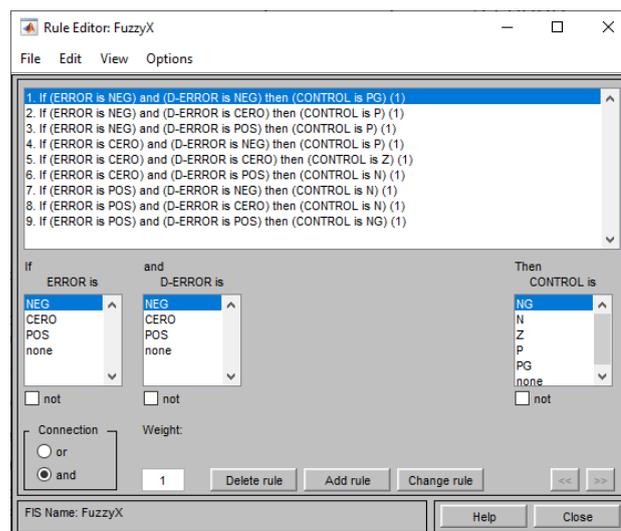


Figura 4. 121: Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY del eje X

Es importante recordar que al diseñar el controlador Fuzzy se define dos variables de entradas las cuales son ERROR y D-ERRO para la medición de la velocidad y el cambio de error se implementan estas dos variables de entradas respectivamente. En la variable de entrada de la derivada del error se coloca un bloque derivativo en tiempo discreto para cumplir con lo antes mencionado.

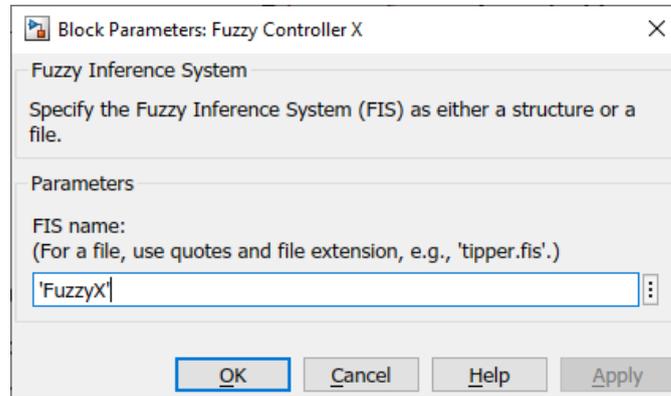


Figura 4. 122: Parametrizar el Bloque FUZZY en Simulink.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para el eje X con los bloques para cumplir con los parámetros creados.

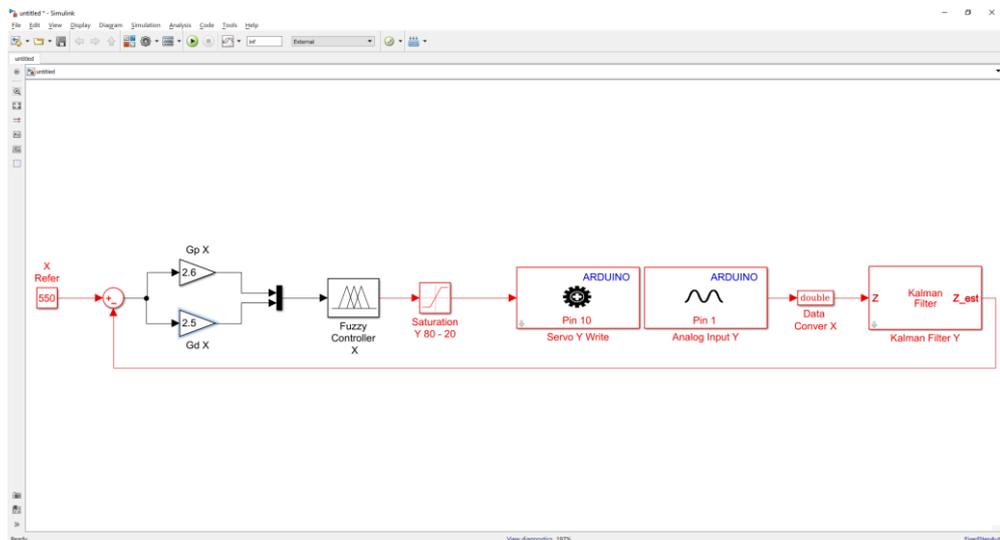


Figura 4. 123: Controlador FUZZY para el eje X.

Paso 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda del bloque “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink.

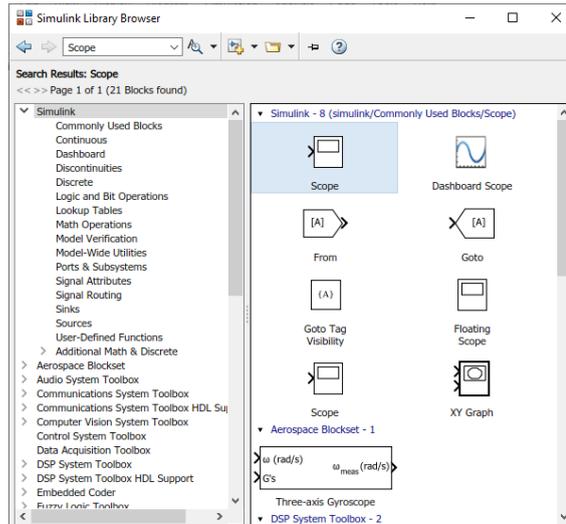


Figura 4. 124: Bloque “Scope” para el eje X.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje X.

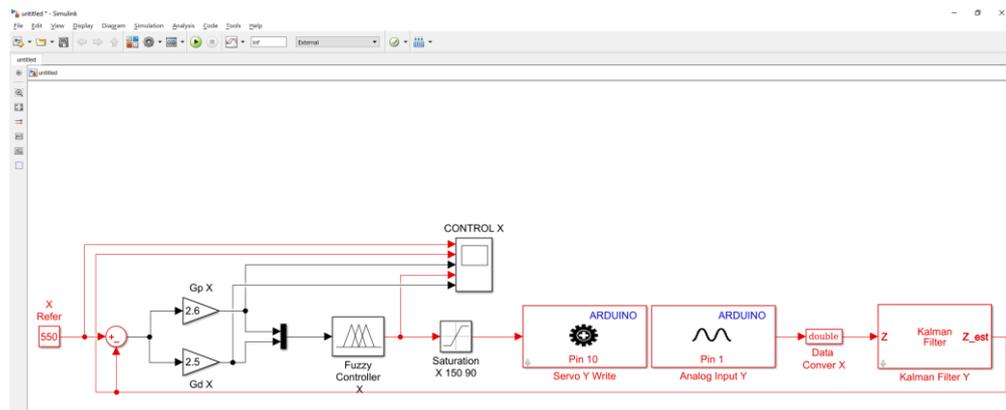


Figura 4. 125: Algoritmo de control FUZZY para el eje X.

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |

```

Figura 4. 126: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje de las X es de 550.

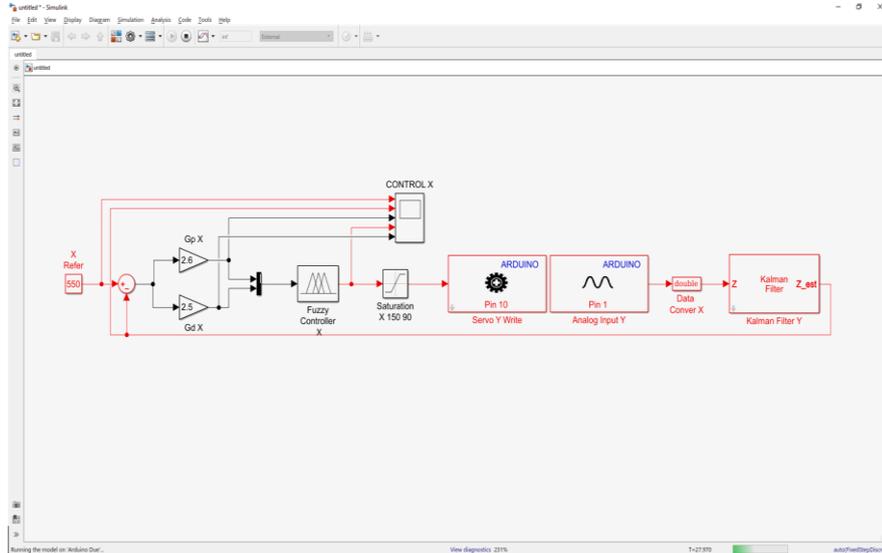


Figura 4. 127: Algoritmo de control FUZZY para el eje X en tiempo real.



Figura 4. 128: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje X.

- Se visualiza que con ayuda del bloque "SCOPE" la señales para la operación del control FUZZY para el eje X.

Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema

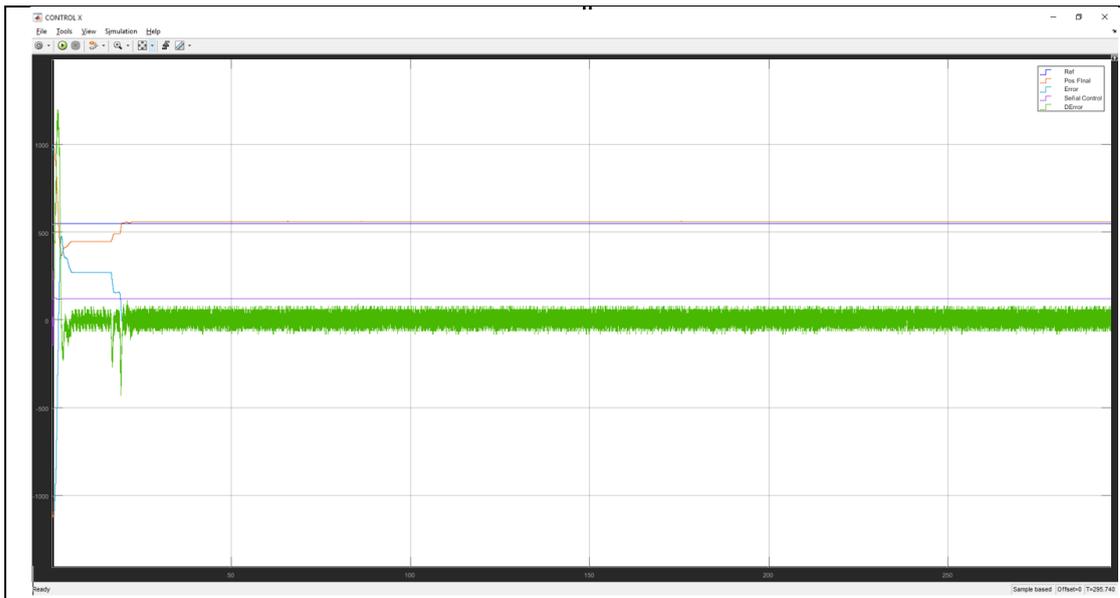


Figura 4. 129: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje X.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-X de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink utilizando el algoritmo de control FUZZY
- Se configura dentro del Toolbox FUZZY las variables de entrada y de salida, las funciones de membresía y las reglas de correspondencia, se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul.

4.8 PRÁCTICA # 8

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control II	
NRO. PRÁCTICA:	7	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL FUZZY PARA EL EJE Y.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Creación de un controlador FUZZY para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque FUZZY y sus atributos. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del FUZZY en el eje Y a la plataforma inercial de 2-GDL. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para el eje Y de la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia. 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato. 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE. 4. Agregar el bloque FUZZY Logic Controller. 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas. 			

Paso 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para el eje Y de la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización del objeto en la referencia.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega el bloque de escritura estándar para servos y el bloque “Analog Input” desde la librería de Simulink.

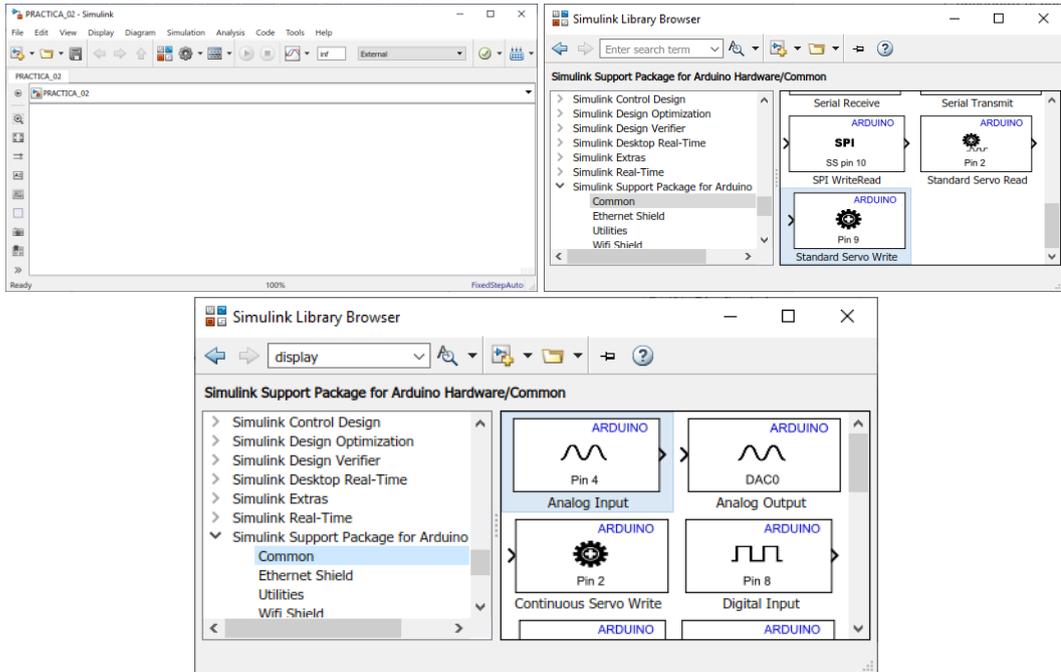


Figura 4. 130: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede añadir el bloque DATA CONVERT a la salida del bloque de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico.

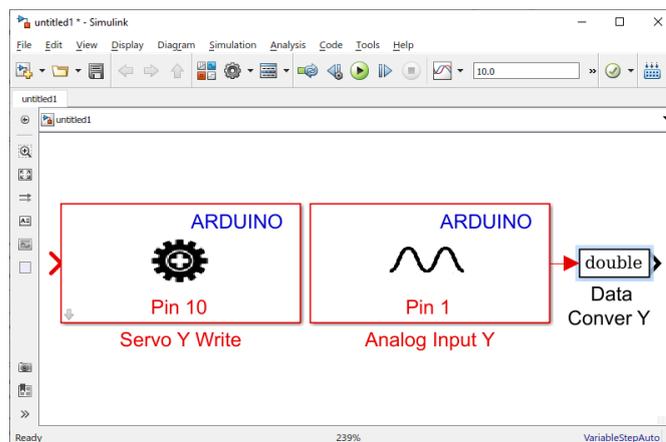


Figura 4. 131: Bloque “Data conve Y” con la variable “doublé”.

Paso 2. Agregar bloque de saturación para limitar el movimiento angular del plato.

Se agrega el bloque de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que el servomotor se debe mover.



Saturation

Figura 4. 132: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-Y trabaja de 20° a 80° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

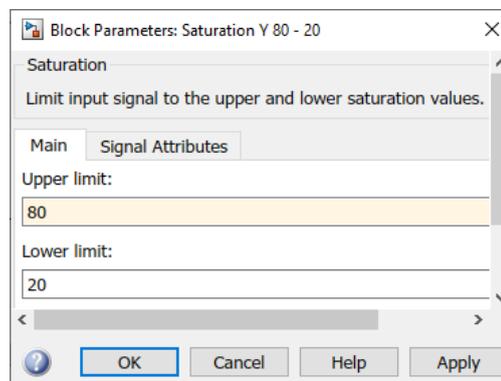


Figura 4. 133: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation”

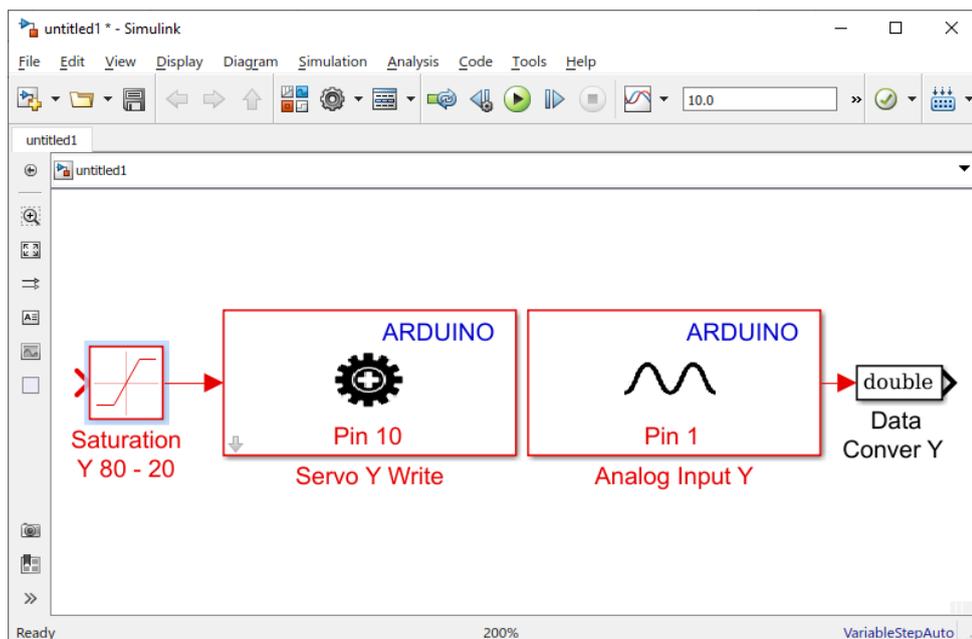


Figura 4. 134: Bloque de saturación para el servomotor Y.

Paso 3. Agregar el bloque de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida del bloque Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir el bloque “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

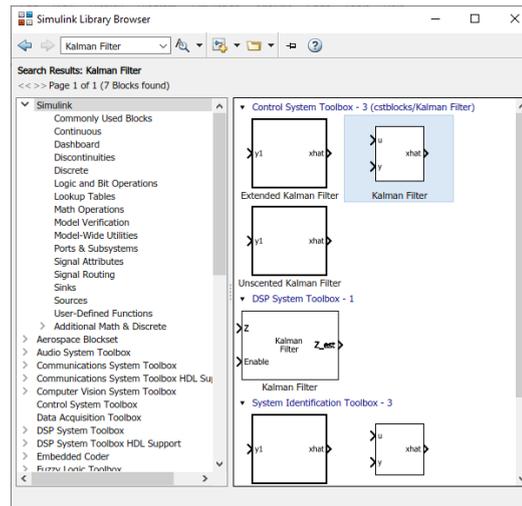


Figura 4. 135: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

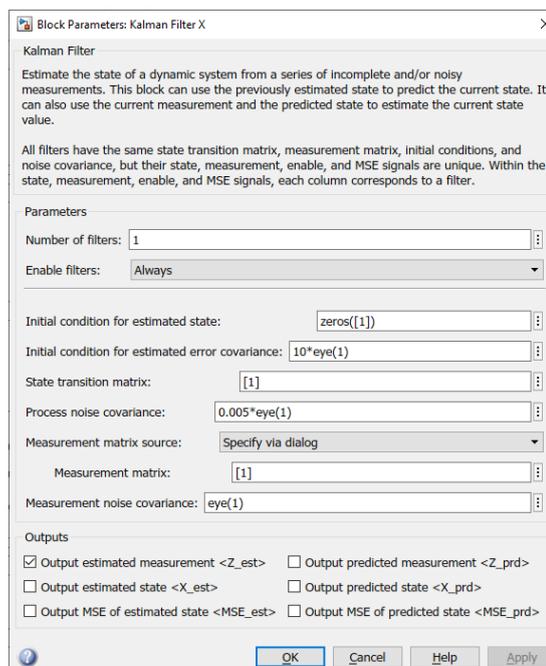


Figura 4. 136: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control FUZZY para el eje y.

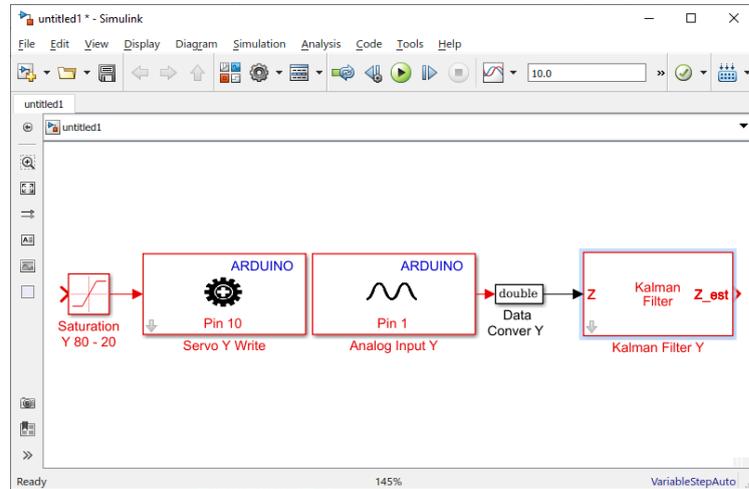


Figura 4. 137: Filtrado de la señal de la pantalla táctil resistiva.

Paso 4. Agregar el bloque FUZZY Logic Controller.

A continuación, se debe añadir el bloque FUZZY, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia. Posterior se cierra el circuito creando el controlador FUZZY para el eje Y en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

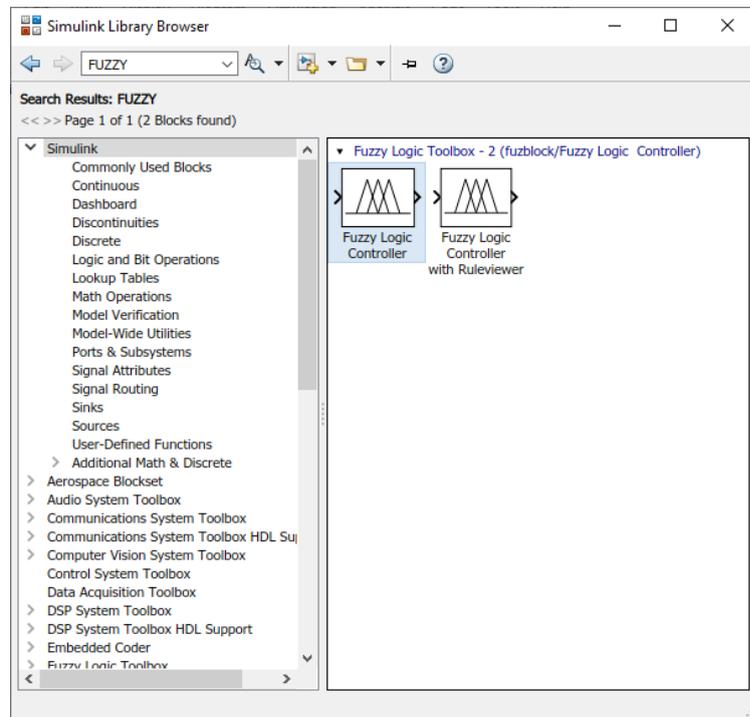


Figura 4. 138: Bloque “FUZZY Logic Controller”.

Se añade el bloque constante para la referencia y se cierra el lazo con la salida del bloque “Kalman Filter”.

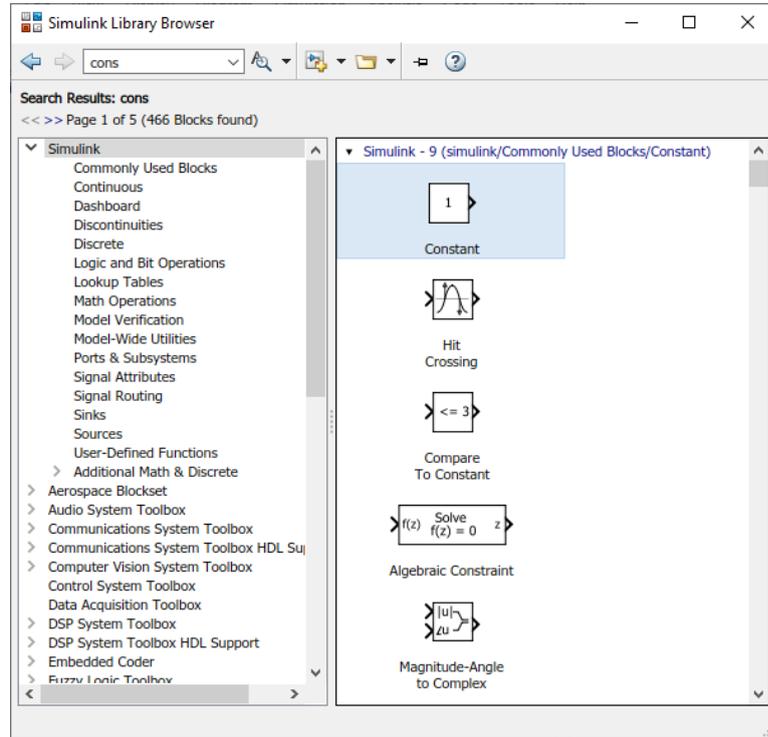


Figura 4. 139: Bloque “Constan” para la referencia del controlador FUZZY.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para el eje Y.

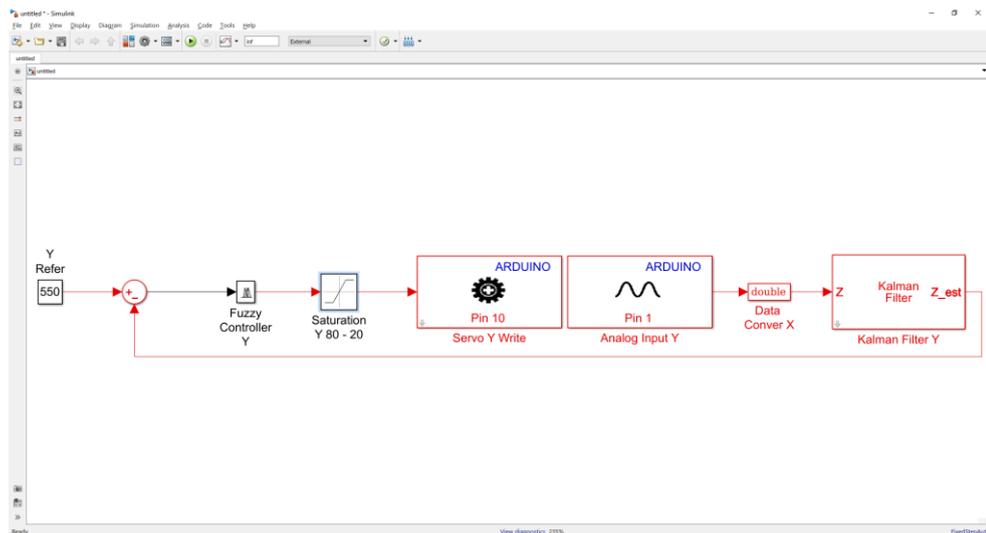


Figura 4. 140: Algoritmo de control PID para el eje Y.

Para cumplir con la utilización del control FUZZY se debe crear las variables a utilizar en el bloque antes mencionado, se escribe en la ventana de comando la palabra “fuzzy” para llamar el toolbox FUZZY.

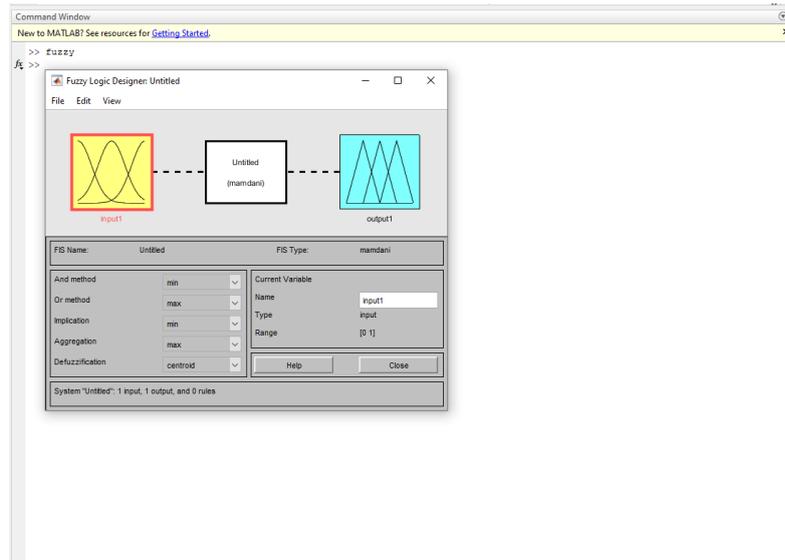


Figura 4. 141: Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.

Para la creación del algoritmo de control se utiliza el método Mamdani.

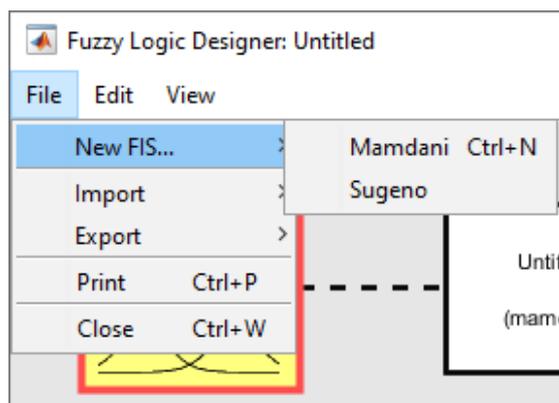


Figura 4. 142: Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.

Se crean dos variables de entrada y una variable de salida.

VARIABLES DE ENTRADAS:

Error, representa la retroalimentación de error de la plataforma inercial de 2-GDL
D-Error, representa la derivada de error.

La variable de Salida:

Control, representa la señal de control hacia los servomotores que entrega la posición angular del bloque fuzzy.

Se define el nombre del bloque FUZZY para el eje X.

FuzzyY, en el entorno de Simulink al utilizar el bloque fuzzy es necesario nombrar al bloque para la definición, para este caso el FUZZY del eje y se llama FuzzyY.

Se muestra la creación de las variables antes mencionados.

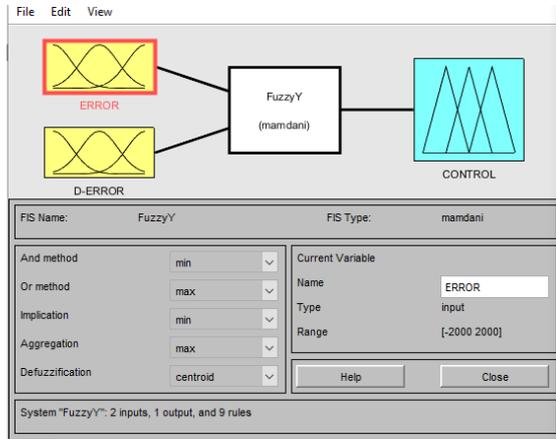


Figura 4. 143: FUZZY para el eje Y.

Se debe editar las funciones de membresía de control para las variables de entradas y la variable de salida y se utilizan funciones gaussianas para el diseño del algoritmo FUZZY para el eje Y.

Variables de entrada:

Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

D-Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

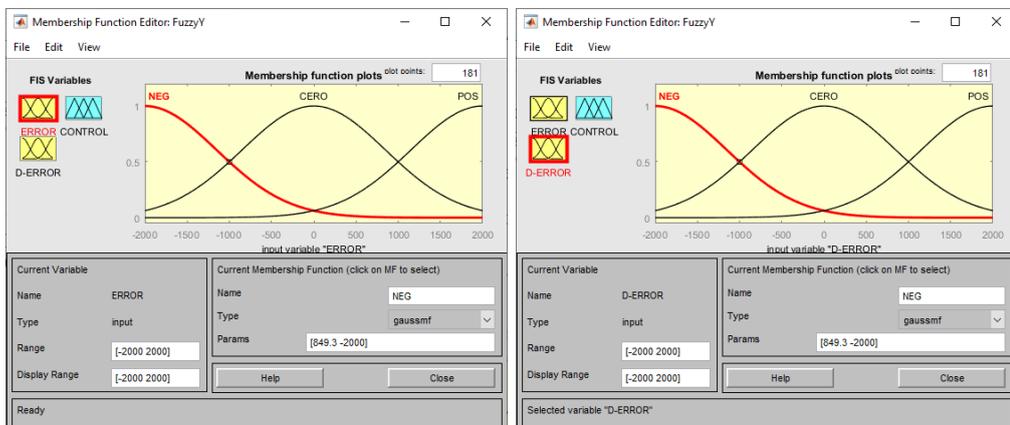


Figura 4. 144: Funciones de membresía para las variables de entrada.

Variable de Salida:

Control, tiene 5 funciones de membresía gaussianas que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 12a 92, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de Y.

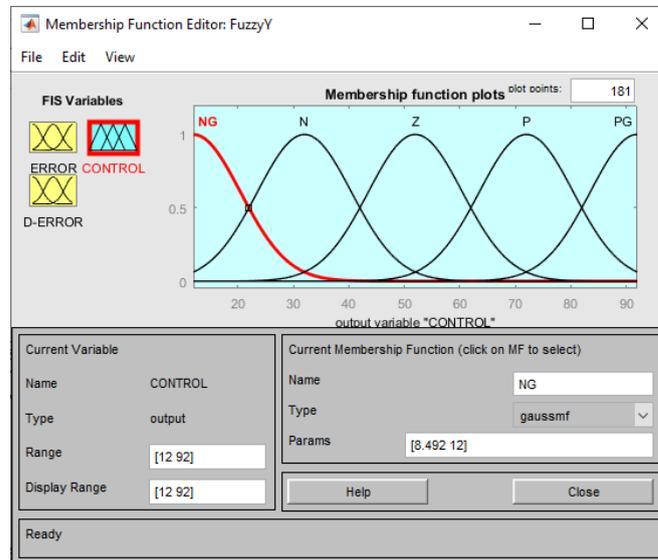


Figura 4. 145: Funciones de membresía para las variables de entrada.

La señal de CONTROL no se realiza ninguna escala a la salida del fuzzy ya que el rango de operación de la señal gaussiana es el rango de operación del movimiento del servomotor en el eje de la Y

Se procede a agregar las reglas en el Toolbox FUZZY de correspondencia para el correcto funcionamiento del controlador.

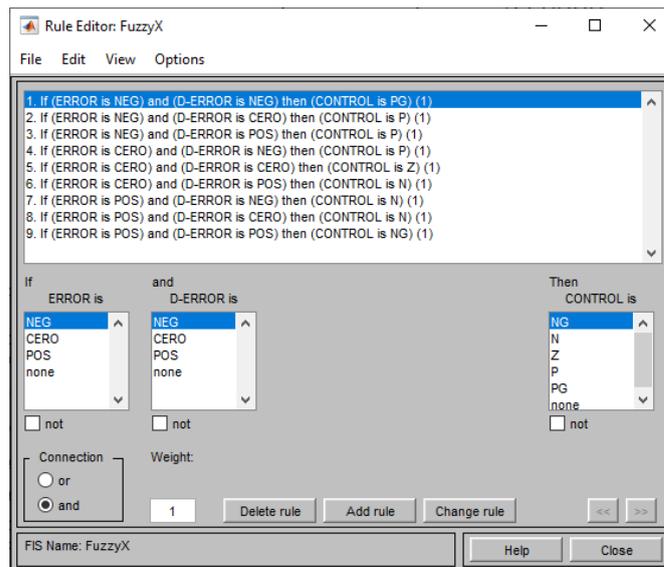


Figura 4. 146: Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY del eje Y

Es importante recordar que al diseñar el controlador FUZZY se define dos variables de entradas las cuales son ERROR y D-ERRO para la medición de la velocidad y el cambio de error se implementan estas dos variables de entradas respectivamente. En la variable de entrada de la derivada del error se coloca un bloque derivativo en tiempo discreto para cumplir con lo antes mencionado.

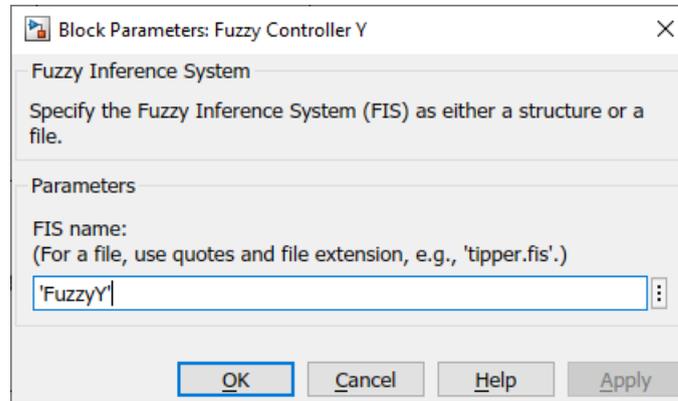


Figura 4. 147: Parametrizar el Bloque FUZZY en Simulink.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para el eje Y con los bloques para cumplir con los parámetros creados.

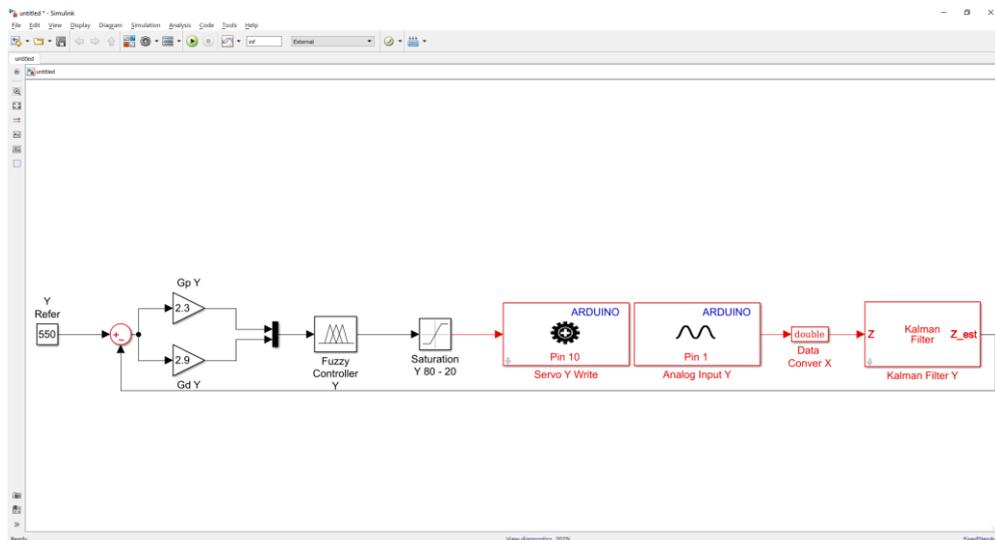


Figura 4. 148: Controlador FUZZY para el eje Y.

Paso 5. Agregar el bloque “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda del bloque “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink.

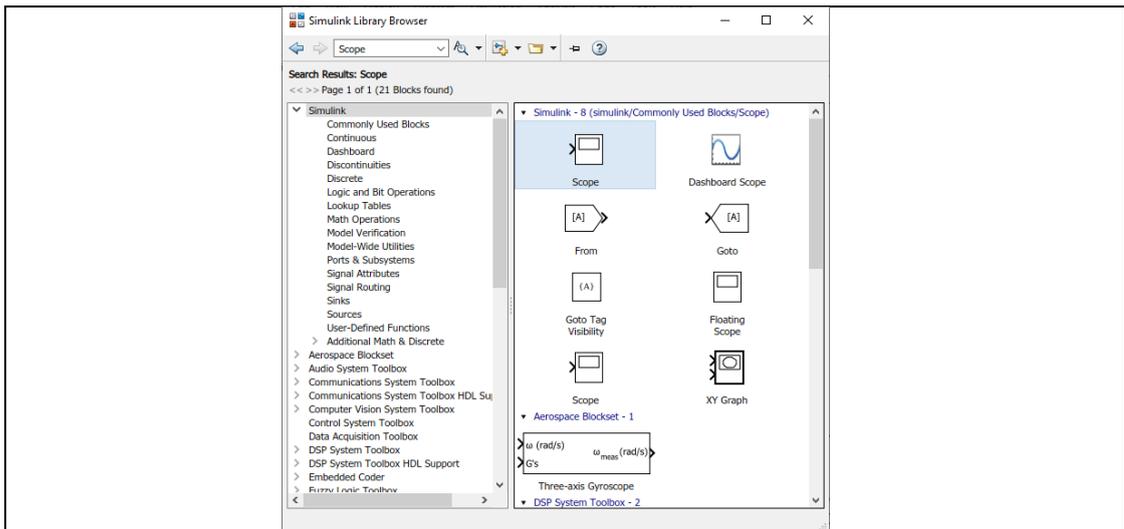


Figura 4. 149: Bloque “Scope” para el eje Y.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje Y.

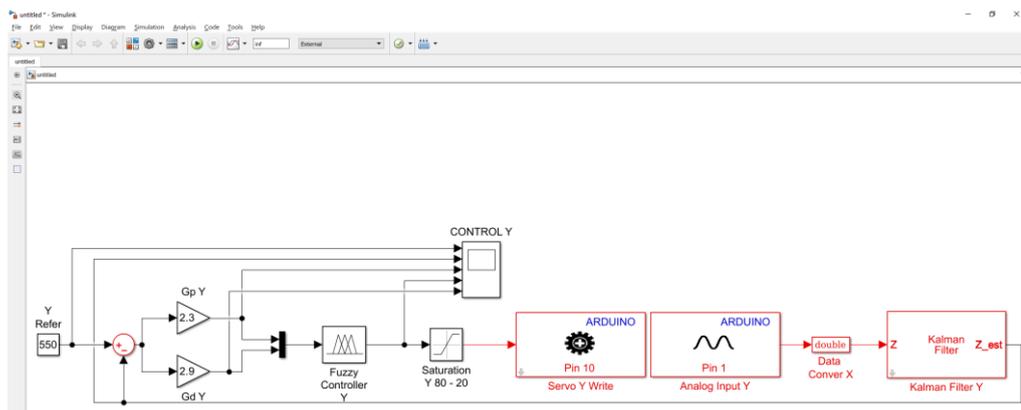


Figura 4. 150: Algoritmo de control FUZZY para el eje Y .

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |
  
```

Figura 4. 151: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje de las Y es de 550.

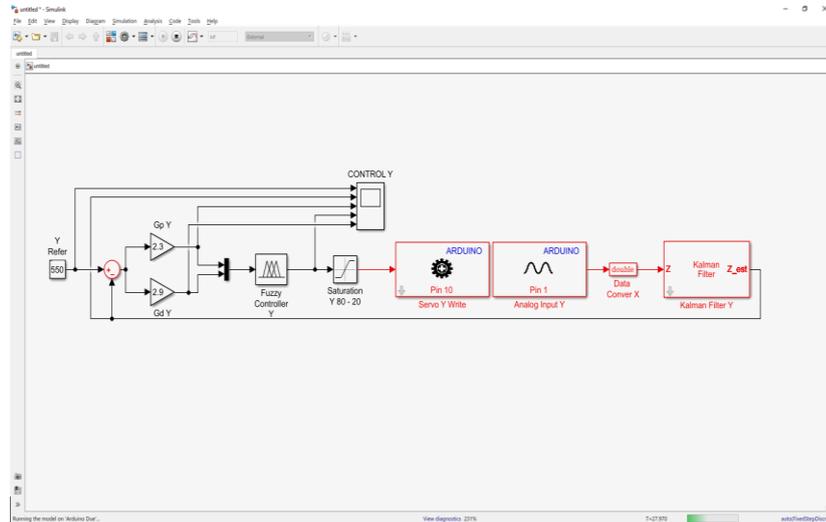


Figura 4. 152: Algoritmo de control FUZZY para el eje Y en tiempo real.



Figura 4. 153: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje Y.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control FUZZY para el eje Y.

Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema

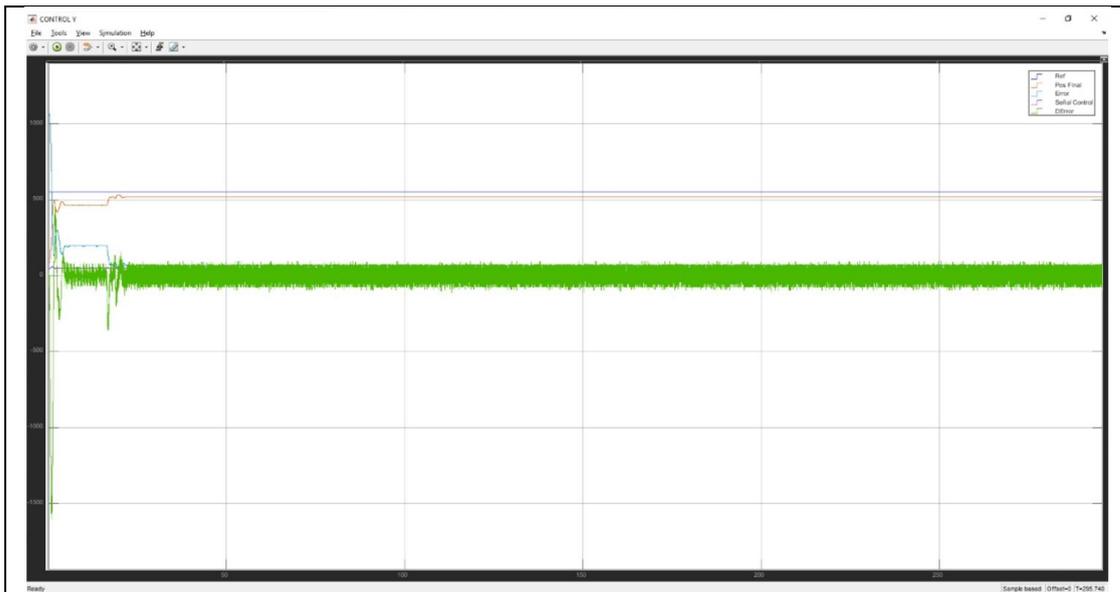


Figura 4. 154: Bloque “SCOPE” utilizado en sistema SISO para el eje Y.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con el motor-Y de plataforma inercial de 2-GDL con el software Matlab/Simulink utilizando el algoritmo de control FUZZY
- Se configura dentro del Toolbox FUZZY las variables de entrada y de salida, las funciones de membresía y las reglas de correspondencia, se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul.

4.9 PRÁCTICA # 9

		GUIA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica		ASIGNATURA: Teoría de Control III	
NRO. PRÁCTICA:	9	TÍTULO DE LA PRÁCTICA: CREACIÓN DEL CONTROL FUZZY PARA LA PLATAFORMA INERCIAL DE 2-GDL.	
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Crear un controlador FUZZY para la estabilización del objeto sobre la pantalla táctil resistiva. • Utilizar el bloque FUZZY y sus atributos para ambos ejes de libertad. • Transformar la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva a variable doble para los ejes X y Y. • Realizar filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva para los ejes X y Y. • Crear un programa en Simulink para enviar la señal de control del FUZZY para la plataforma inercial de 2-GDL. • Diseñar una trayectoria elíptica para que la esfera lo siga indefinidamente. 			
INSTRUCCIONES		<ol style="list-style-type: none"> 1. Alimentar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” con 110VAC. 2. Confirmar que la botonera tipo hongo o paro de emergencia no esté accionada. 3. Encender la planta presionando el botón de marcha. 4. Verificar que se cuente con paquetes y drivers necesarios para la comunicación de la planta (PRÁCTICA #1). 5. Conectar la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” al computador utilizando el cable USB macho-macho. 6. Visualizar las luces indicadoras de encendido en la planta. 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para la planta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia que se establece en el eje X y Y. 			

2. Agregar los bloques de saturación para limitar el movimiento angular del plato para los ejes X y Y.
3. Agregar los bloques de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva de los ejes X y Y por el Arduino DUE.
4. Agregar el bloque FUZZY Logic Controller.
5. Agrega dos bloques para el diseño de la señal elíptica de la trayectoria que la esfera sigue indefinidamente
6. Agregar los bloques “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Paso 1. Creación del algoritmo de control FUZZY para la panta “Plataforma inercial de 2-GDL” para la estabilización de la esfera en la referencia que se establece en el eje X y Y.

Se procede a abrir un modelo en blanco en Simulink, se agrega dos bloques de escritura estándar para servos y dos bloques “Analog Input” desde la librería de Simulink.

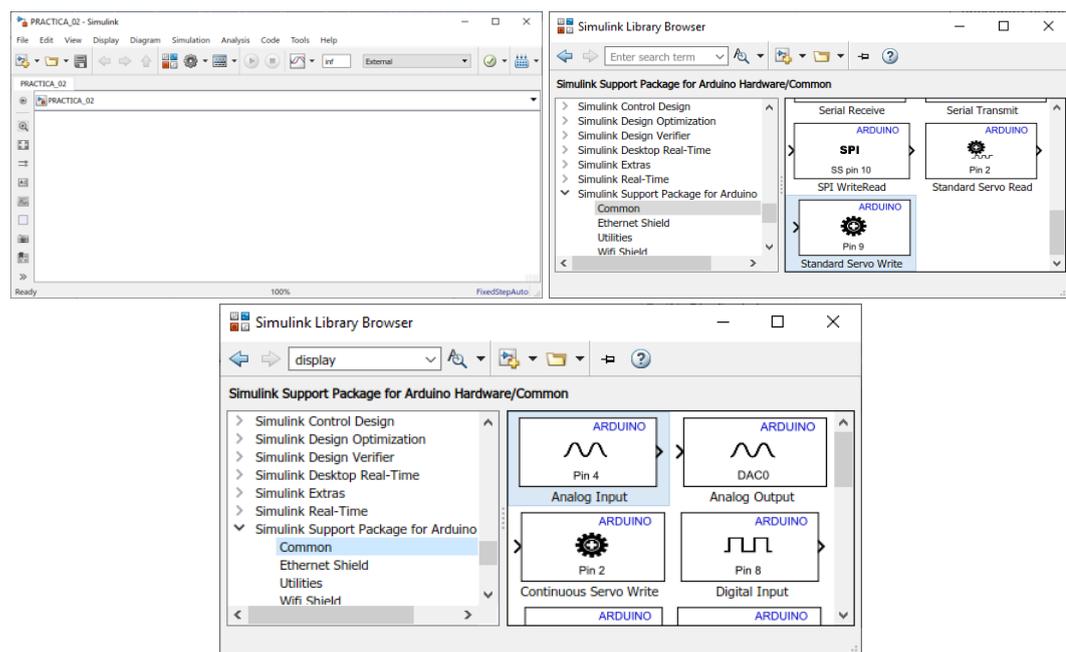


Figura 4. 155: Simulink modelo en blanco y Librería para Arduino.

Se procede añadir los bloques DATA CONVERT a la salida de los bloques de Analog Input para la transformación de la señal analógica de single a doble como se muestra en el siguiente gráfico.

A continuación se observa en el ambiente Simulink el proceso de la practica con los bloques antes mencionados.

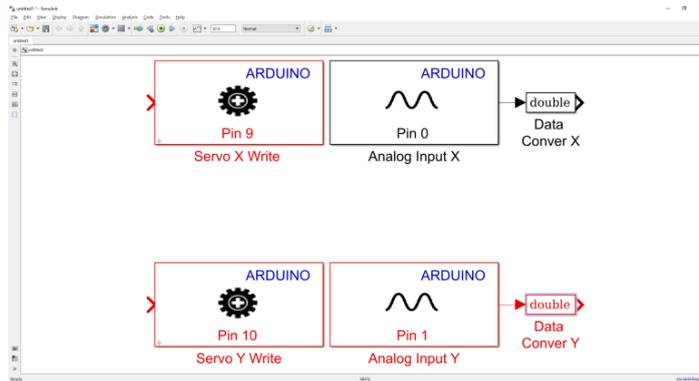


Figura 4. 156: Bloque “Data conver” con la variable “doublé”.

Paso 2. Agregar los bloques de saturación para limitar el movimiento angular del plato para los ejes X y Y.

Se agrega dos bloques de saturación que sirve para limitar con los rangos máximos y mínimos que los servomotores se deben mover.



Figura 4. 157: Bloque “Constant” en la librería de Simulink.

El motor-X trabaja de 90 A 150 y el motor-Y trabaja de 20° a 80° estos son los valores que se configuran para el bloque de saturación.

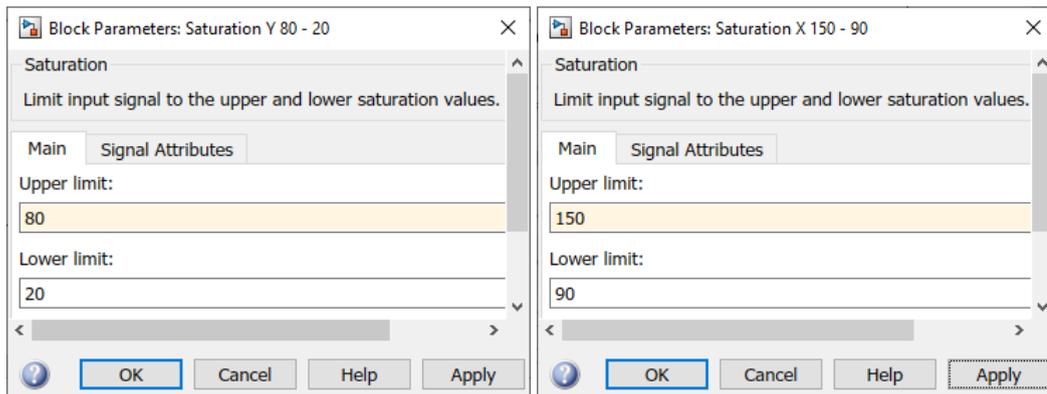


Figura 4. 158: Parámetros del Bloque “Constant”.

Se muestra el resultado de agregar el bloque de “Saturation” en el ambiente de Simulink para evidenciar el proceso de la práctica a realizar.

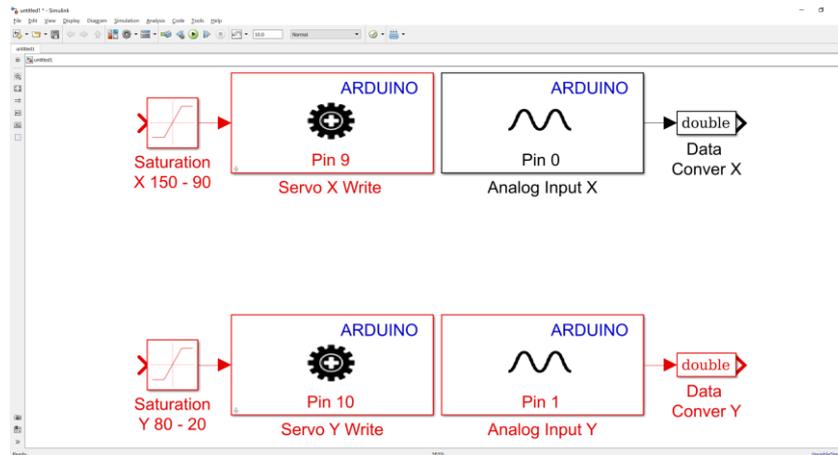


Figura 4. 159: Bloque de saturación para los servomotores X y Y.

Paso 3. Agregar los bloques de filtrado de la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva de los ejes X y Y por el Arduino DUE.

La señal que se obtenida de los bloques Analog Input que nos muestran los valores en voltaje del objeto sobre la pantalla táctil resistiva se la debe filtrar para reducir la mayor cantidad de ruido.

Para realizar lo antes mencionado se debe añadir dos bloques “Kalman Filter” que se lo encuentra en la librería de Simulink como se muestra a continuación.

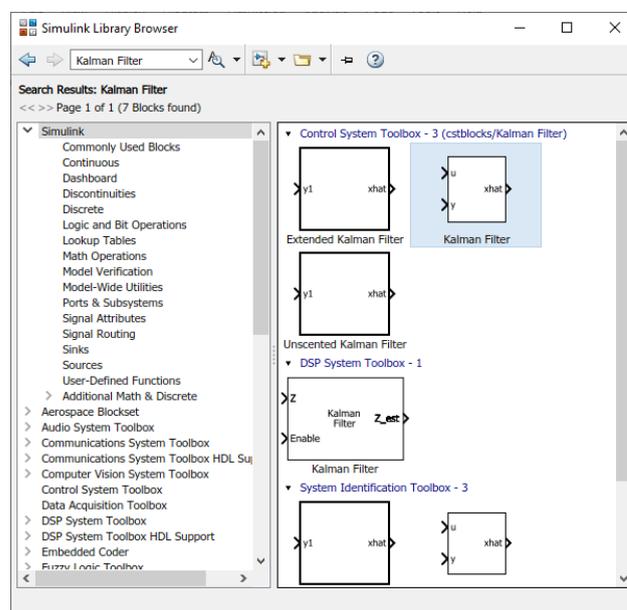


Figura 4. 160: Bloque Kalman Filter en la librería de Simulink.

Para la utilización del filtro se debe modificar los parámetros del bloque “Kalman Filter” para un correcto uso del bloque antes mencionado.

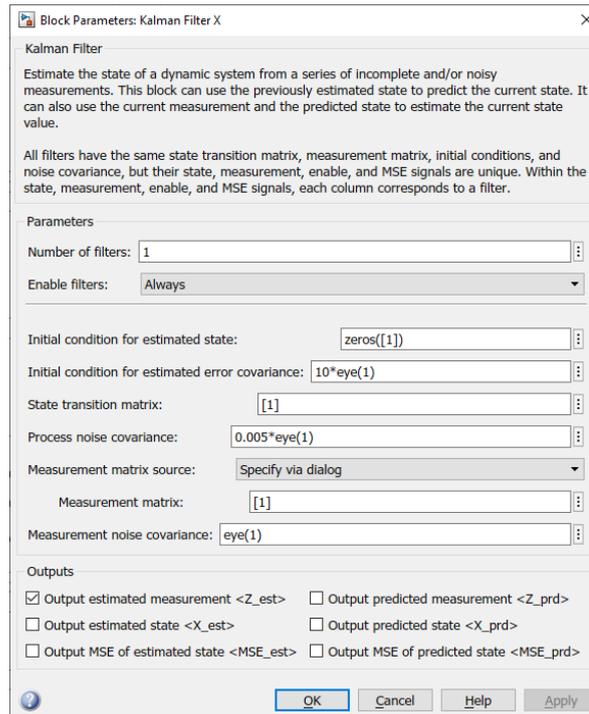


Figura 4. 161: Parametrización para el bloque “Kalman Filter”.

Se muestra a continuación los bloques agregados al Simulink hasta el presente paso para el diseño del algoritmo de control FUZZY para la plataforma inercial de 2-GDL.

Los bloques que se utilizan son para las protecciones de la plataforma inercial de 2-GDL a cualquier movimiento brusco y lograr mitigar los daños a la planta didáctica.

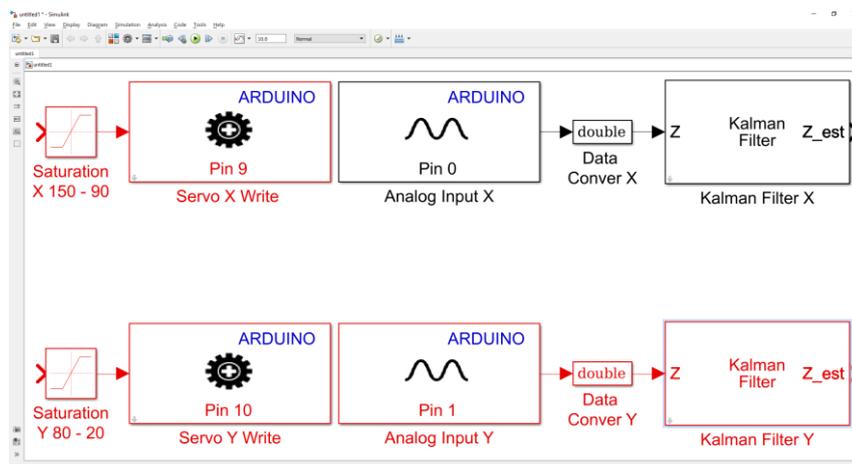


Figura 4. 162: Filtrado de las señales de la pantalla táctil resistiva.

Paso 4. Agregar los bloques FUZZY Logic Controller

A continuación, se debe añadir dos bloques FUZZY Logic Controller, adicional se crea un bloque constante indicando la referencia por cada eje de libreta. Posterior se cierra el circuito creando el controlador FUZZY para el eje X y Y en tiempo discreto, todos los bloques antes mencionados se encuentran en la librería de Simulink.

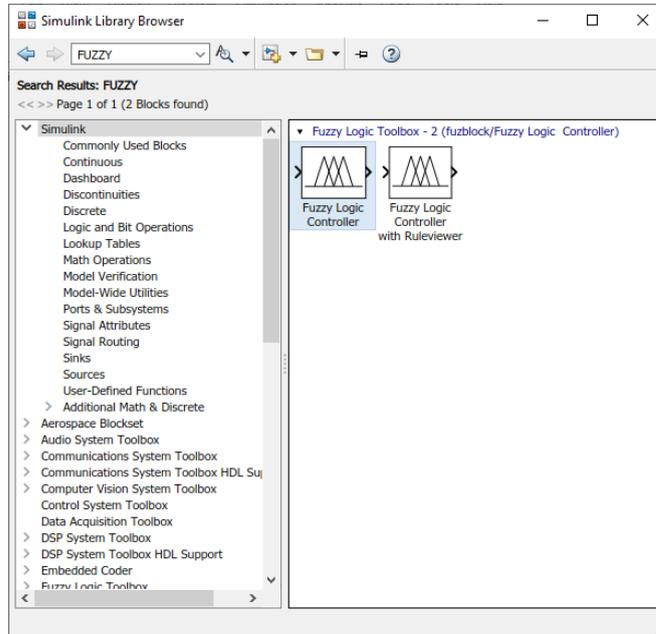


Figura 4. 163: Bloque “FUZZY Logic Controller”.

Se añade los bloques constantes para las referencias y se cierra el lazo con la salida de los bloques “Kalman Filter” del eje X y Y.

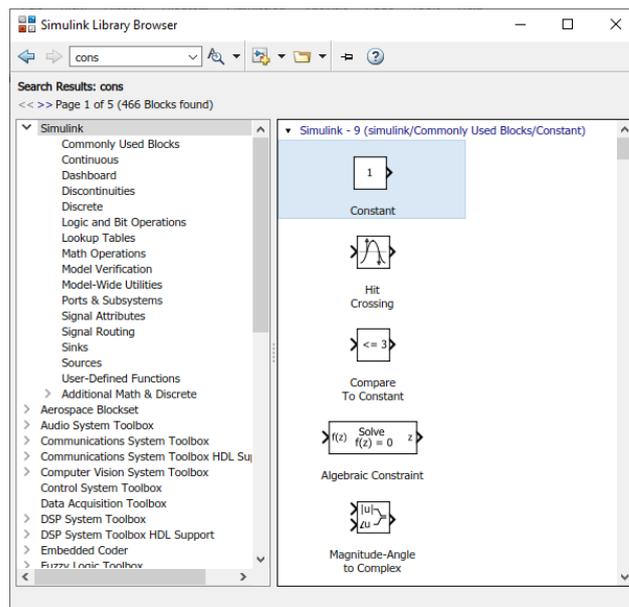


Figura 4. 164: Bloque “Constant” para la referencia del controlador PID.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para la plataforma inercial de 2-GDL.

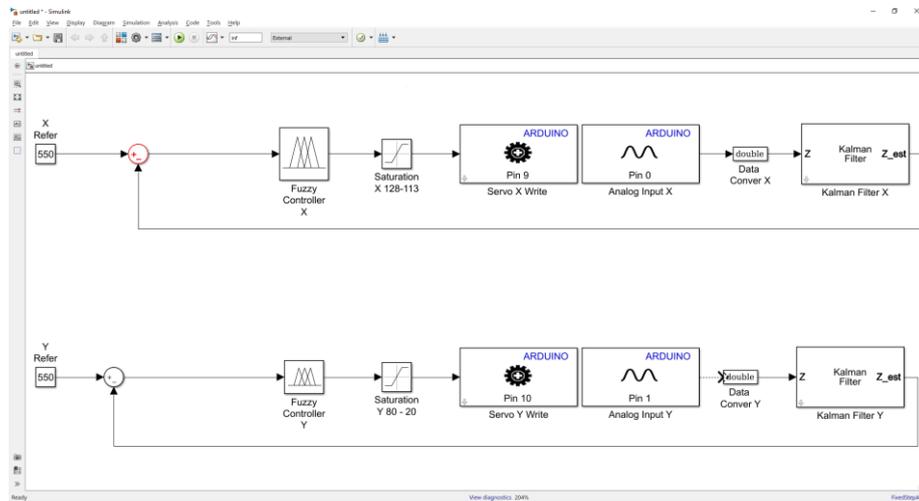


Figura 4. 165: Algoritmo de control FUZZY.

Para cumplir con la utilización del control FUZZY se debe crear las variables a utilizar en los bloques antes mencionados, se escribe en la ventana de comando la palabra “fuzzy” para llamar el toolbox FUZZY.

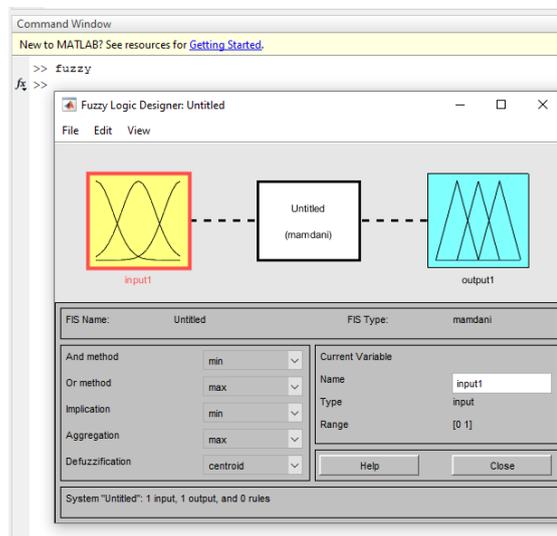


Figura 4. 166: Ventana de comando para llamar al Toolbox Fuzzy.

Se debe realizar el proceso de las prácticas al detalle para cumplir con los objetivos y el correcto funcionamiento de la plataforma inercial con el controlador FUZZY.

Para la creación de los algoritmos de control se utiliza el método Mamdani.

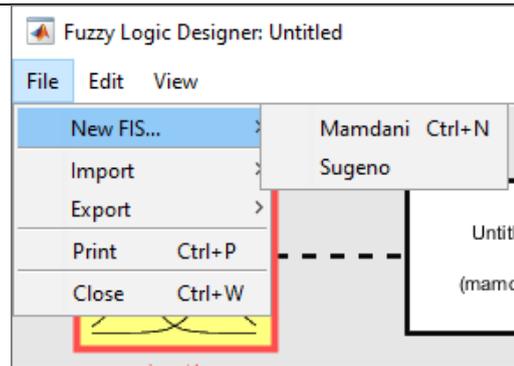


Figura 4. 167: Método Mamdani para la creación del algoritmo FUZZY.

Se crean dos variables de entrada y una variable de salida para cada controlador FUZZY.

Variables de entradas:

Error, representa la retroalimentación de error de la plataforma inercial de 2-GDL
D-Error, representa la derivada de error.

La variable de Salida:

Control, representa la señal de control hacia los servomotores que entrega la posición angular del bloque fuzzy.

Se define el nombre del bloque FUZZY para el eje X y Y.

FuzzyX, en el entorno de Simulink al utilizar el bloque fuzzy es necesario nombrar al bloque para la definición, para este caso el fuzzy del eje x se llama FuzzyX.

FuzzyY, en el entorno de Simulink al utilizar el bloque fuzzy es necesario nombrar al bloque para la definición, para este caso el FUZZY del eje x se llama FuzzyY.

Se muestra la creación de las variables antes mencionados.

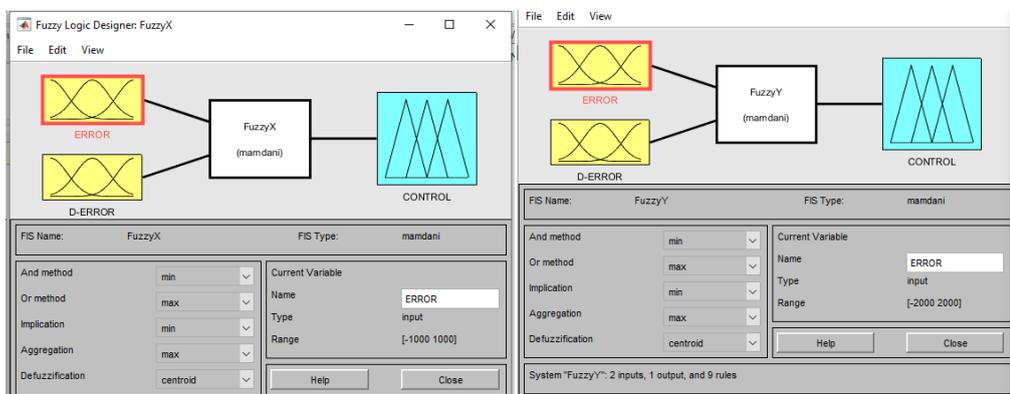


Figura 4. 168: FUZZY para el eje X y Y.

Se debe editar las funciones de membresía de control para las variables de entradas y la variable de salida y se utilizan funciones gaussianas para el diseño

del algoritmo FUZZY para el eje X y Y.

Variables de entrada:

FuzzyX

Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

D-Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

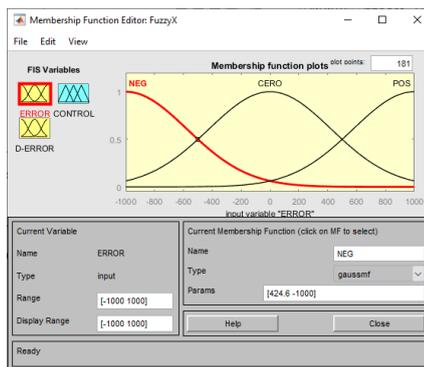


Figura 4. 169: Funciones de membresía para FuzzyX.

FuzzyY

Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

D-Error, tiene 3 funciones de membresía gaussianas, dicha funciones tienen los siguientes nombres, NEG (Negativo), CERO (Cero) y POS (Positivo), que operan en el rango de -1000 a 1000.

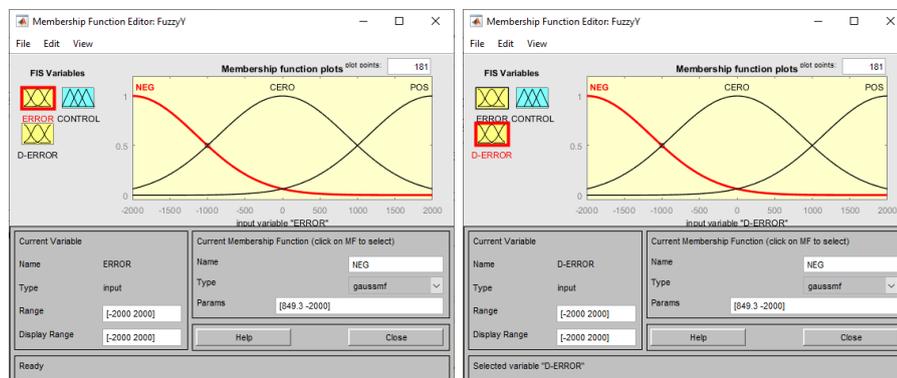


Figura 4. 170: Funciones de membresía para FuzzyY.

Variable de Salida para FuzzyX y FuzzyY:

FuzzyX

Control, tiene 5 funciones de membresía gaussianas que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 107.5 a 127.5, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de X.

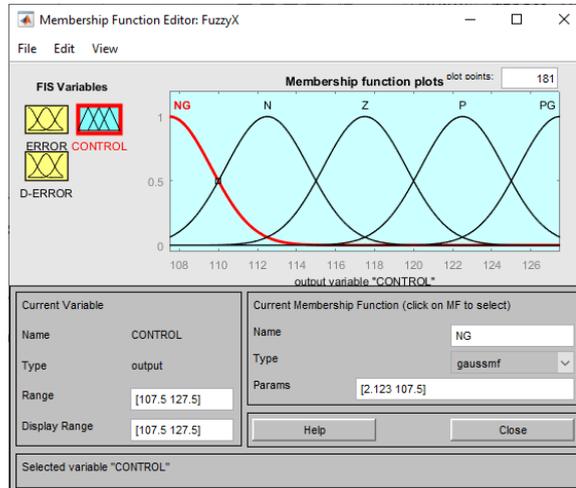


Figura 4. 171: Funciones de membresía para las variables de entrada.

FuzzyY

Control, tiene 5 funciones de membresía gaussianas que se denominan NG (Negativo grande), N (Negativo), Z (Cero), P (Positivo) y PG (Positivo grande), que funcionan en el rango de 12 a 92, este rango es el movimiento del servomotor en el eje de Y.

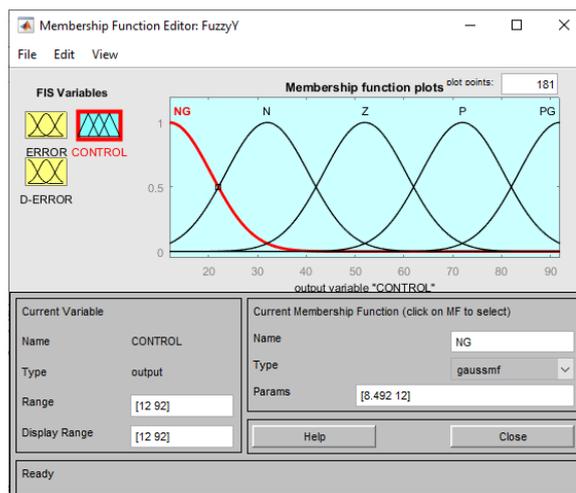


Figura 4. 172: Funciones de membresía para FuzzyY.

La señal de CONTROL no se realiza ninguna escala a la salida del FUZZY ya que el rango de operación de la señal gaussiana es el rango de operación del movimiento del servomotor en el eje X y Y

Se procede a agregar las reglas en el Toolbox FUZZY de correspondencia para el correcto funcionamiento del controlador.

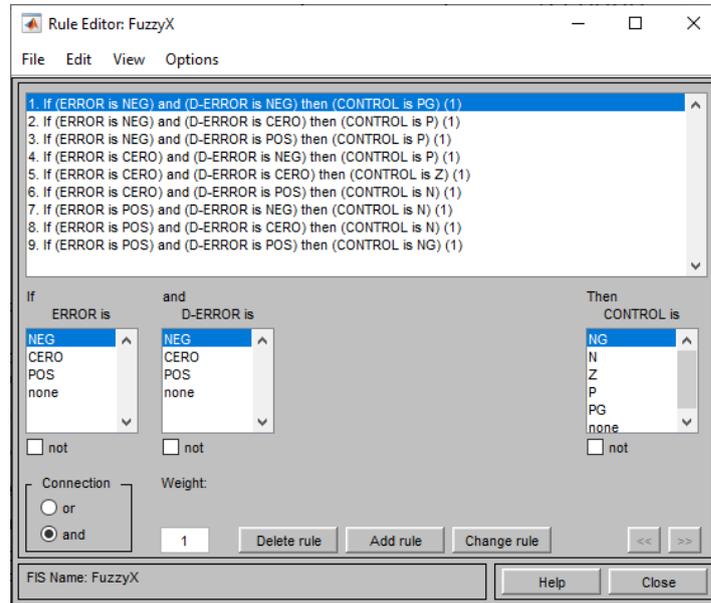


Figura 4. 173: Reglas de correspondencia para el controlador FUZZY.

Es importante recordar que al diseñar los controladores Fuzzy se define dos variables de entradas las cuales son ERROR y D-ERRO respectivamente para la medición de la velocidad y el cambio de error se implementan estas dos variables de entradas respectivamente. En la variable de entrada de la derivada del error se coloca un bloque derivativo en tiempo discreto para cumplir con lo antes mencionado.

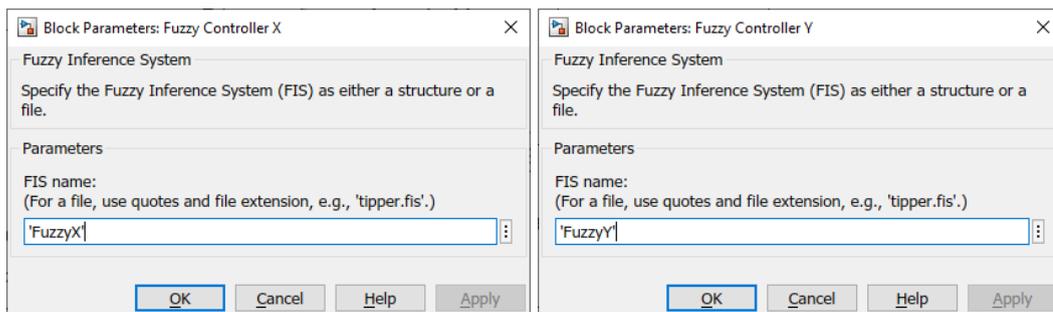


Figura 4. 174: Parametrizar los Bloque FUZZY en Simulink.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para el eje X y Y con los bloques para cumplir con los parámetros creados.

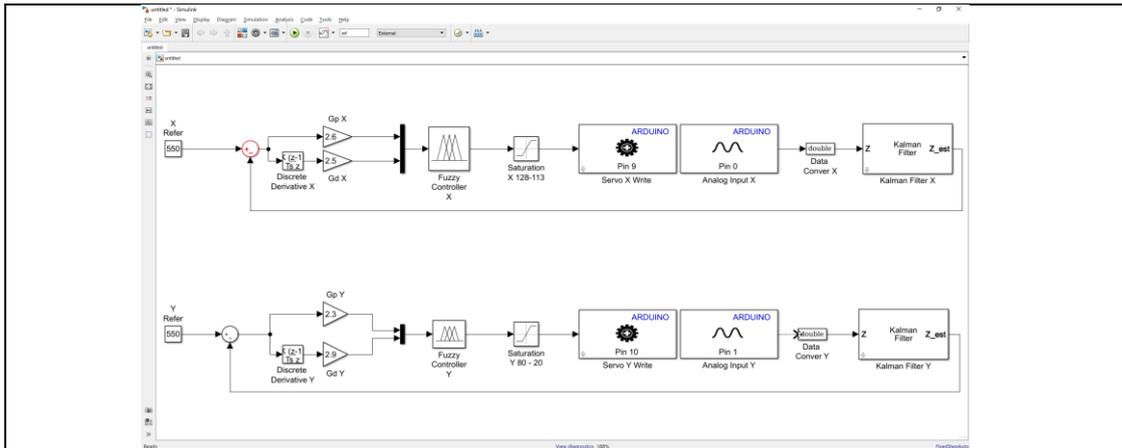


Figura 4. 175: Bloque FUZZY en Simulink.

Paso 5. Agrega dos bloques para el diseño de la señal de la trayectoria elíptica que la esfera sigue indefinidamente

Para el seguimiento de la trayectoria elíptica de la esfera se crea 2 bloques “Sine Wave” para el eje X y Y que se encuentra en la librería de Simulink, se crean dos señales sinusoidales con un desfase de 0.30 radianes para la creación de la señal elíptica que esfera sigue sobre la pantalla fácil resistiva.

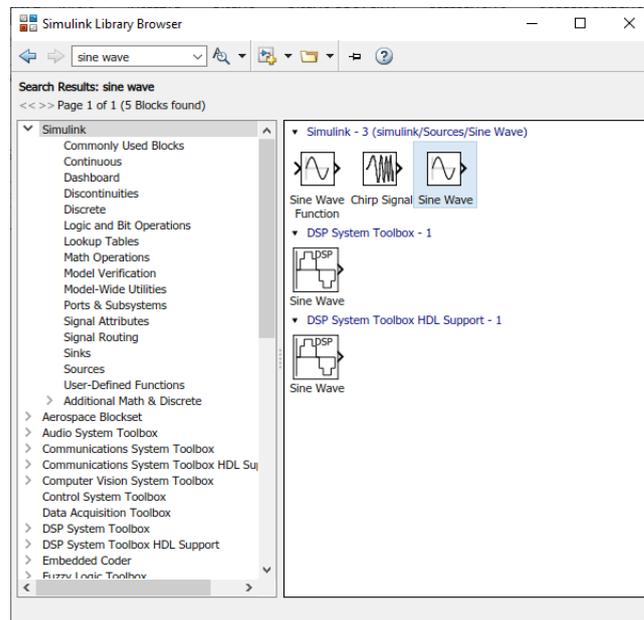


Figura 4. 176: Bloque “Sine Wave” para la creación de la señal circular

Se parametriza los dos bloques “Sine Wave” como se observa en la siguiente figura para la creación de la señal circular que se envían como referencia a la entrada del bloque FUZZY para el eje X y Y.

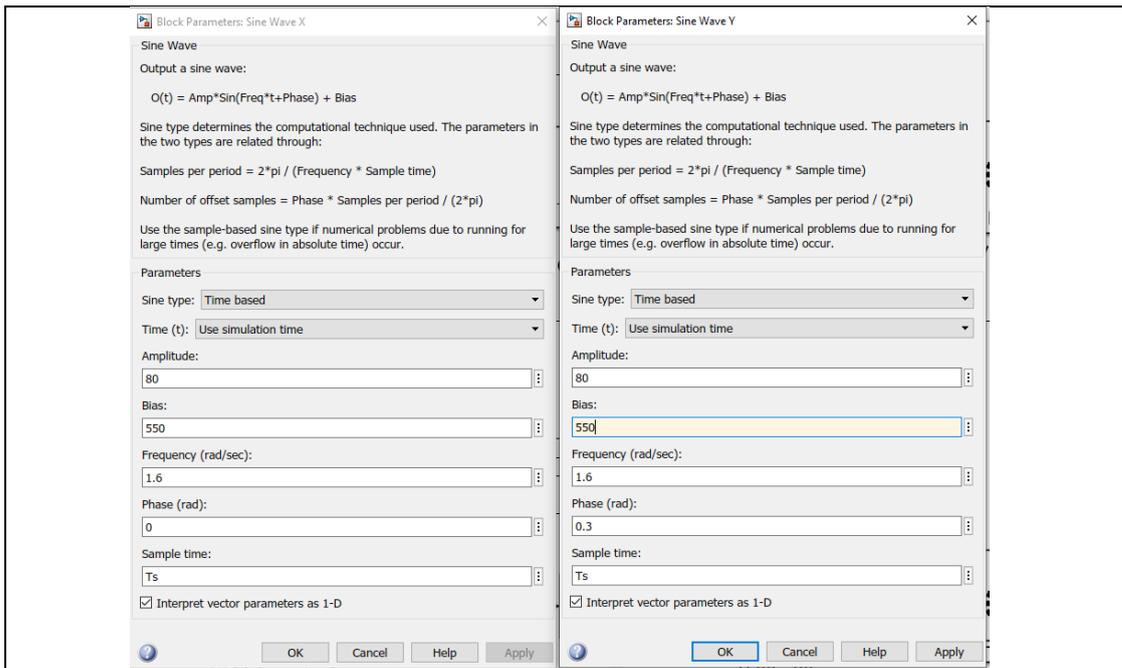


Figura 4. 177: Parametrización de los bloques “Sine Wave”.

A continuación, se muestra el algoritmo de control FUZZY para la plataforma inercial de 2-GDL.

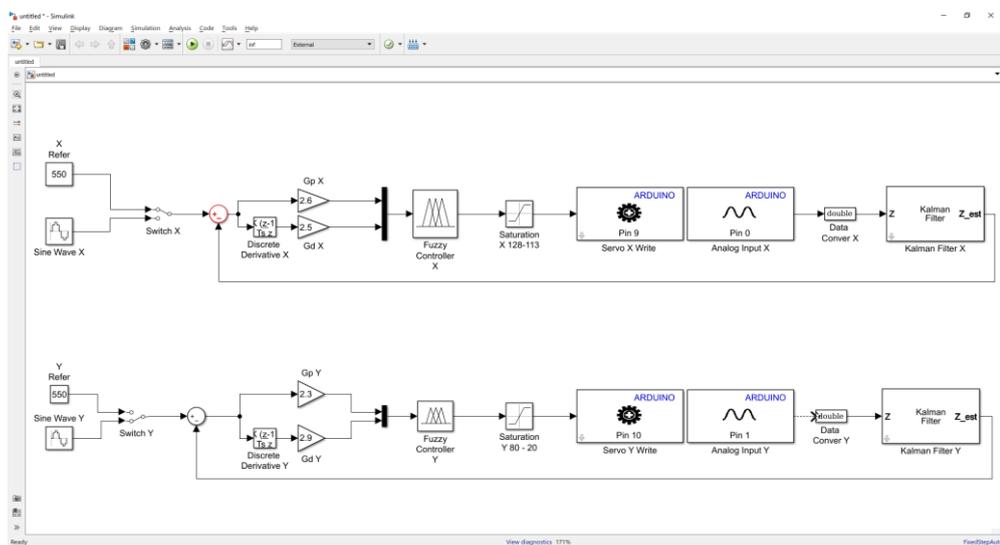


Figura 4. 178: Algoritmo de control FUZZY con el seguimiento de trayectoria

Paso 6. Agregar dos bloques “SCOPE” para la visualización de las señales obtenidas.

Con la ayuda de dos bloques “Scope” se visualizarán las diferentes señales para el análisis de los resultados, el bloque en mención se lo encuentra en la librería de Simulink,

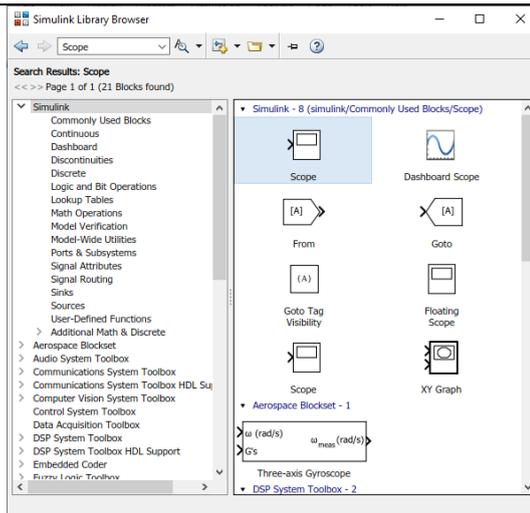


Figura 4. 179: Bloques “Scope” para el eje X y Y.

Se procede a configurar el bloque para visualizar las señales del control aplicado al eje X y Y.

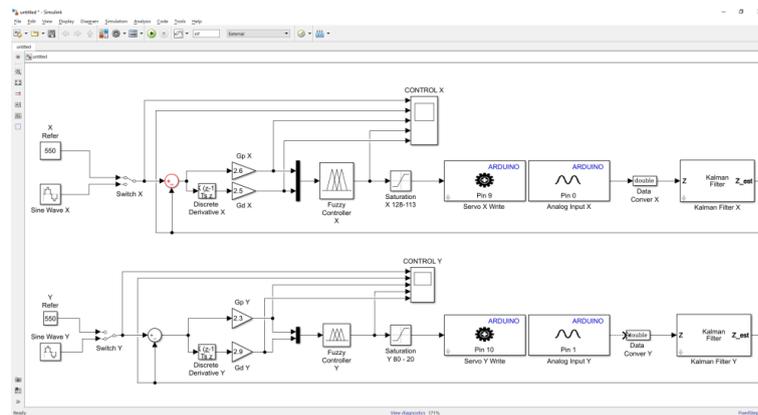


Figura 4. 180: Algoritmo de control FUZZY para el eje X y Y.

Para proceder a poner en marcha nuestro algoritmo, se debe configurar el parámetro “sample time” de todos los bloques de simulink con la variable del tiempo de muestreo (T_s) creado en Matlab. El tiempo de muestreo T_s es de 0.01 y se lo debe de escribir en la ventana de comando de Matlab como se muestra a continuación.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Ts=0.01

Ts =

    0.0100

fx >> |
  
```

Figura 4. 181: Variable T_s en la ventana de comando de Matlab.

RESULTADO(S) OBTENIDO(S)

- Se comprueba la posición del objeto sobre el plato, se encuentra en la posición deseada de manera visual, la referencia para el eje de las X y Y es de 550.

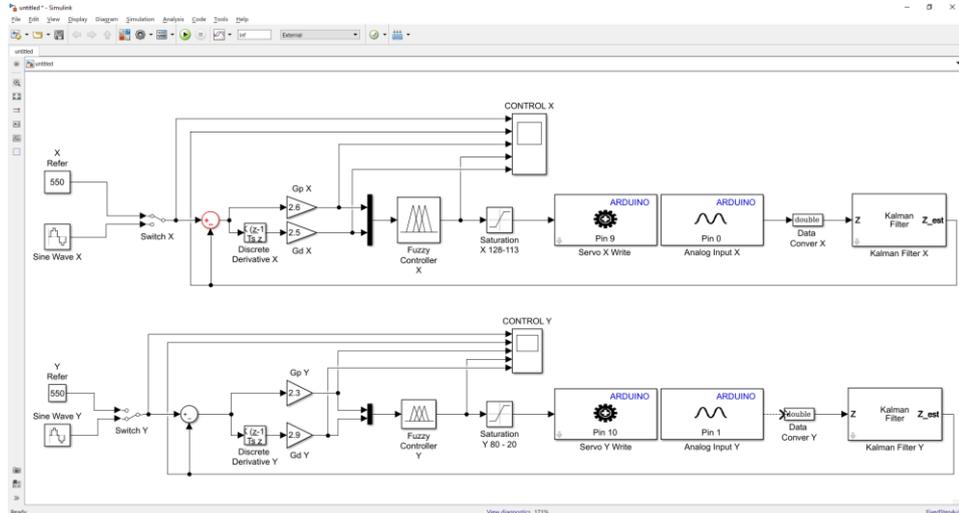


Figura 4. 182: Algoritmo de control FUZZY para el eje de las X y Y.



Figura 4. 183: Posición del objeto en la referencia 550 para el eje de las X y Y.

- Se visualiza que con ayuda del bloque "SCOPE" la señales para la operación del control FUZZY para el eje de las X y Y. Donde la señal de color amarillo es la referencia del sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema.

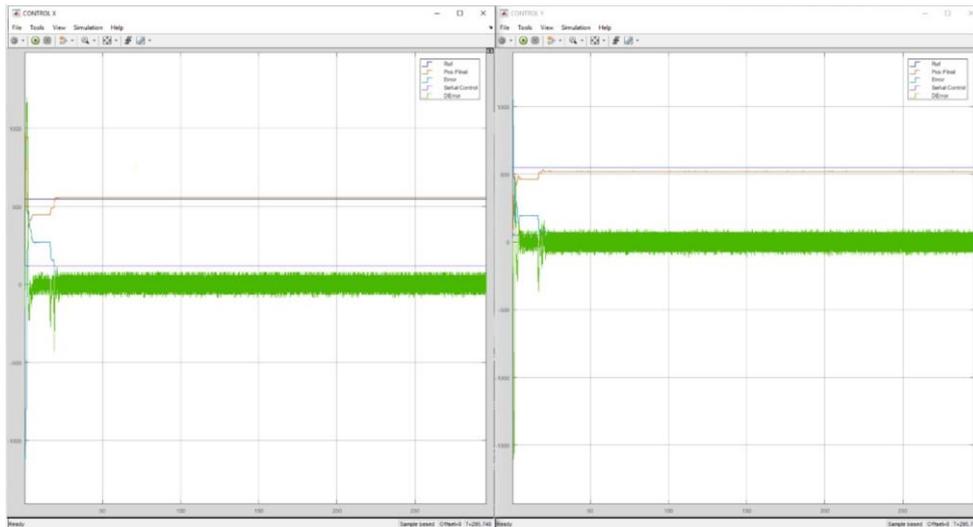


Figura 4. 184: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.

- Se comprueba el seguimiento de la esfera de la trayectoria elíptica sobre el plato, a continuación, se muestra la evidencia del seguimiento de la trayectoria.

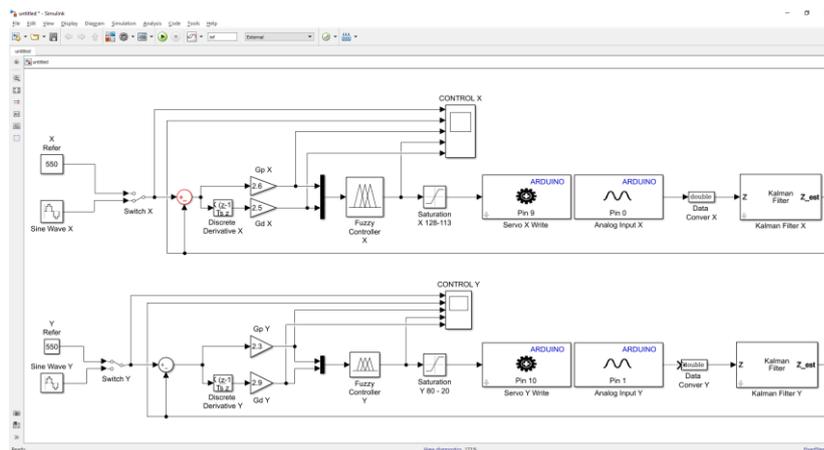


Figura 4. 185: Algoritmo de control FUZZY para el seguimiento de trayectoria.

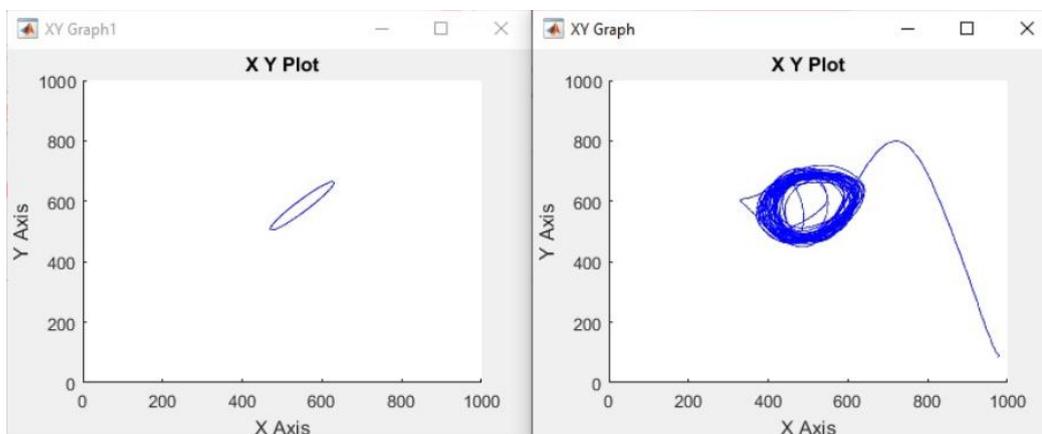


Figura 4. 186: Grafica del seguimiento de la elíptica.

- Se visualiza que con ayuda del bloque “SCOPE” la señales para la operación del control FUZZY para el seguimiento de la esfera de la señal generada.

Donde la señal de color amarillo es la señal circular generada que ingresa al sistema, la señal de color azul es la salida del sistema, la señal de color marrón es el error del sistema

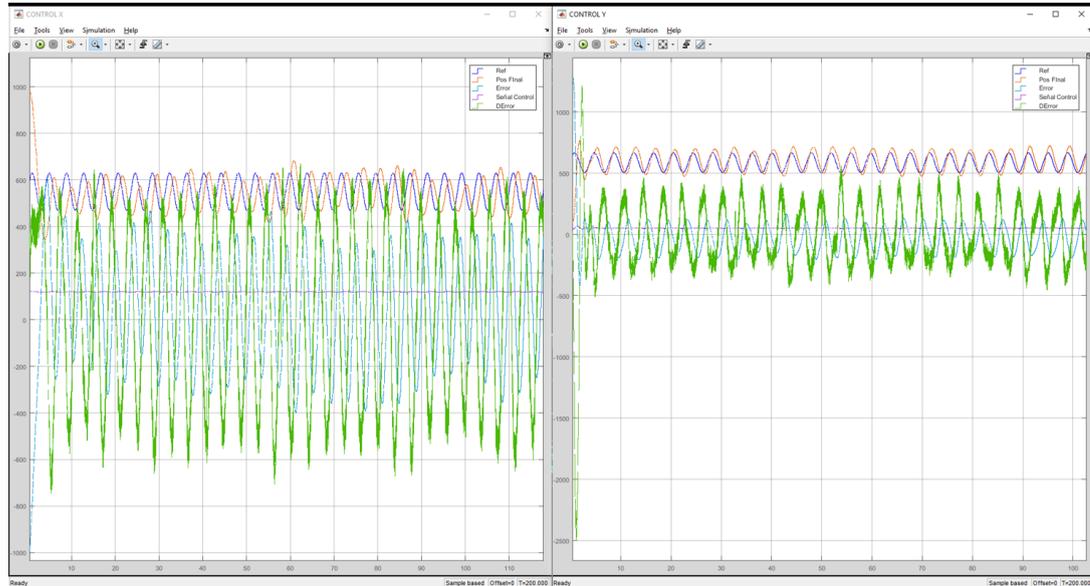


Figura 4. 187: Bloque “SCOPE” para el eje de las X y Y.

CONCLUSIONES:

- Se obtiene una comunicación exitosa con la planta didáctica y el software Matlab/Simulink.
- Se configura el bloque FUZZY para el eje de las X y Y, se obtiene que el objeto sobre el plato se ubique en la referencia del sistema de manera correcta.
- El bloque de saturación protege la planta para que no usen valores de ángulos que puedan ocasionar daños en la estructura mecánica.
- Se configura el bloque “Kalman Filter” de manera correcta para que la señal obtenida de la pantalla táctil resistiva este sin ruido la cual observamos en la señal de color Azul.
- Se realiza con éxitos el seguimiento de la esfera de la trayectoria elíptica.

RESULTADOS

Al término del proyecto de titulación se evidencia un cambio en la estructura de la plataforma inercial de 2-GDL tanto en sus partes mecánicas y electrónicas, a continuación, se exponen los resultados obtenidos.



Figura 5. 1: Plataforma Inercial de 2-GDL.



Figura 5. 2: Tarjeta PCB instalada.

Para obtener un mejor movimiento de la plataforma inercial de 2-GDL se reubican los motores y se incorporan brazos articuladores para transmitir el movimiento al plato donde reposa la pantalla táctil resistiva. Los motores que se utilizan son servomotores, que con la ayuda de la tarjeta PCB y la pantalla táctil resistiva se cumple con la propuesta de realizar el proyecto de titulación con elementos de bajo costos.

Se instala un panel de control para que los estudiantes que realicen pruebas con la plataforma inercial de 2-GDL tengan un control físico. A continuación, mostramos el resultado obtenido del panel de control de la plataforma inercial de 2-GDL.



Figura 5. 3: Panel de control.

El panel de control cuenta con botones pulsadores para la marcha y paro, un botón tipo hongo como paro de emergencia y luces piloto como indicadores del encendido y la puesta en marcha. En el panel de control también se encuentra el puerto USB que se utiliza como medio de comunicación con la tarjeta PCB.

Con el fin de mostrar los resultados obtenidos al aplicar los controladores diseñados para la plataforma inercial de 2-GDL, se exporta al Workspace la variable de error de los controladores PID y FUZZY para obtener los porcentajes de error de los controladores diseñados.

Controlador PID

A continuación, con ayuda de Matlab y el valor exportado de Simulink se muestra el análisis de error del controlador PID.

Se exporta 100 registros de la variable de salida y se lo compara con la referencia y se obtiene los siguientes resultados.

Para el eje X se tiene un error del 6.58% y se adjunta la imagen del control aplicado donde la referencia es del color amarillo, la señal de salida es de color azul y la señal de color marrón es el error.

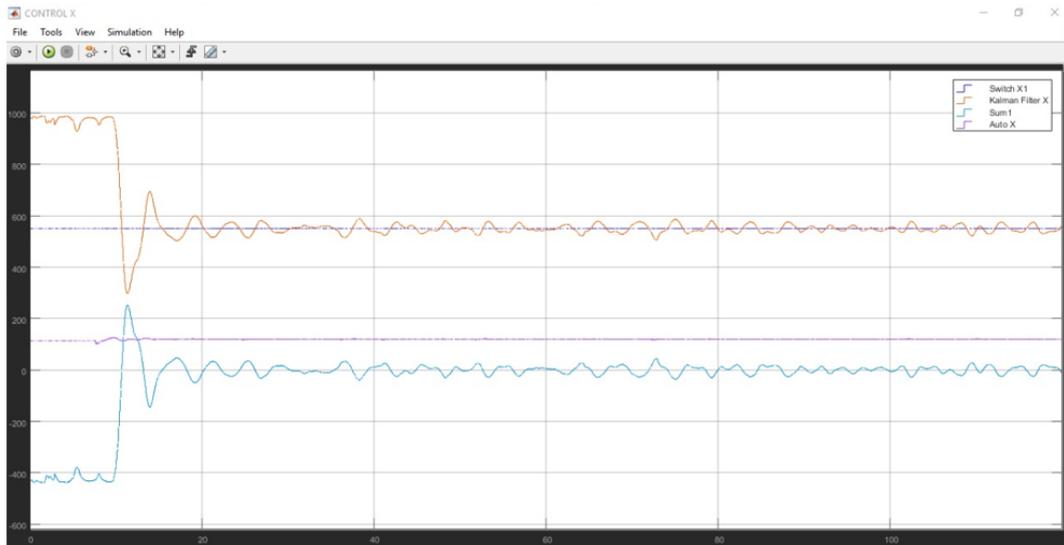


Figura 5. 4: Análisis de la respuesta en tiempo real del PID en el eje X.

Para el eje Y se tiene un error del 3.9% y se adjunta la imagen del control aplicado donde la referencia es del color amarillo, la señal de salida es de color azul y la señal de color marrón es el error.

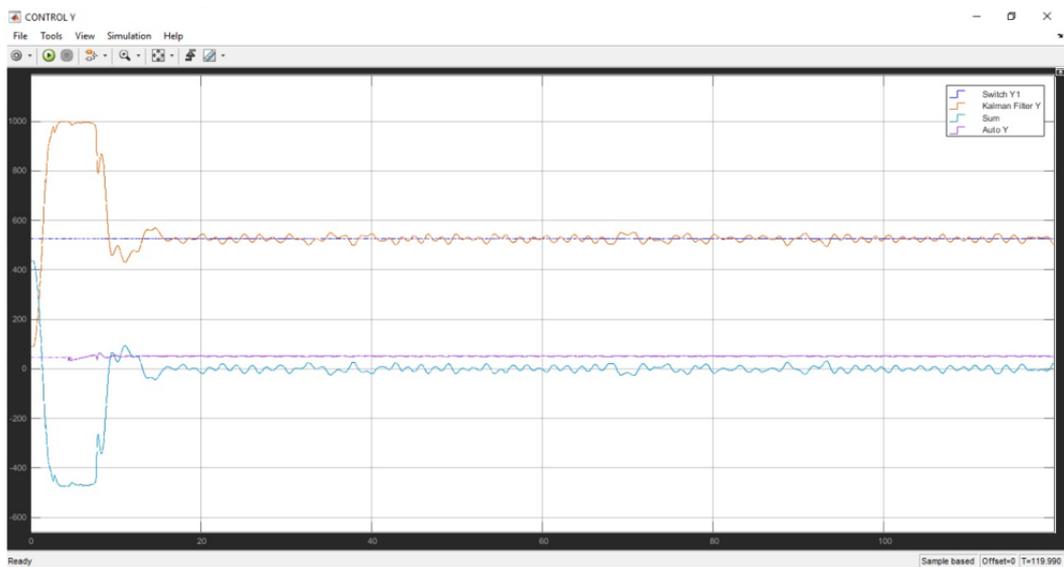


Figura 5. 5: Análisis de la respuesta en tiempo real del PID en el eje Y.

Estos resultados obtenidos son gracias al algoritmo de control automático PID diseñado en tiempo discreto en Matlab/Simulink que se muestra a continuación.

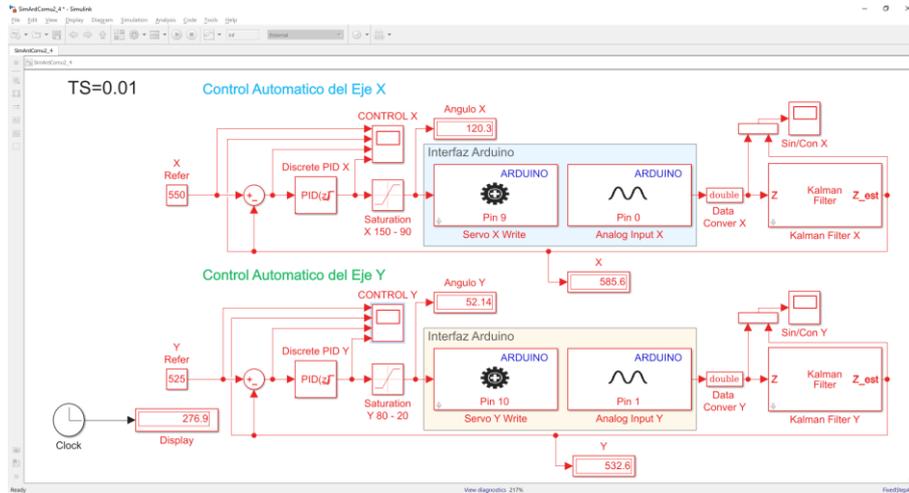


Figura 5. 6: Algoritmo de control PID en tiempo real.

El resultado del error del controlador PID para la plataforma inercial de 2-GDL es de 5.24%.

Controlador FUZZY.

A continuación, con ayuda de Matlab y el valor exportado de Simulink se muestra el análisis de error del controlador FUZZY.

Se exporta 100 registros de la variable de salida y se lo compara con la referencia y se obtiene los siguientes resultados.

Para el eje X se tiene un error del 5.24% y se adjunta la imagen del control aplicado donde la referencia es del color amarillo, la señal de salida es de color azul y la señal de color marrón es el error.

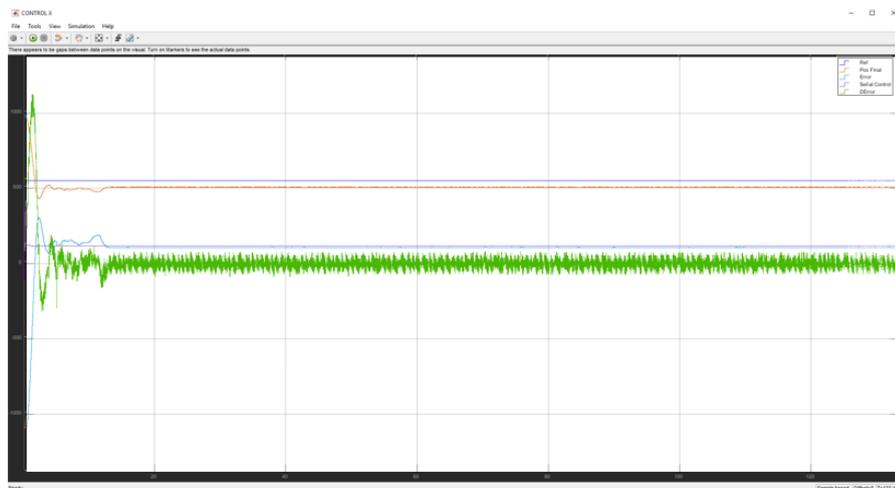


Figura 5. 7: Análisis de la respuesta en tiempo real del FUZZY en el eje X.

Para el eje Y se tiene un error del 0.09% y se adjunta la imagen del control aplicado donde la referencia es del color amarillo, la señal de salida es de color azul y la señal de color marrón es el error

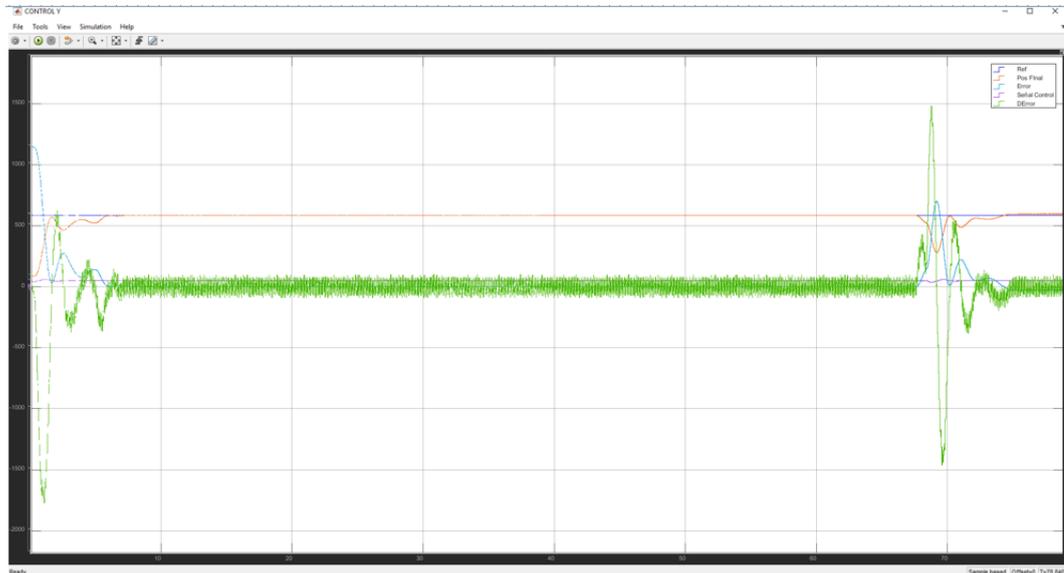


Figura 5. 8: Análisis de la respuesta en tiempo real del FUZZY en el eje Y.

Estos resultados obtenidos son gracias al algoritmo de control automático PID diseñado en tiempo discreto en Matlab/Simulink que se muestra a continuación.

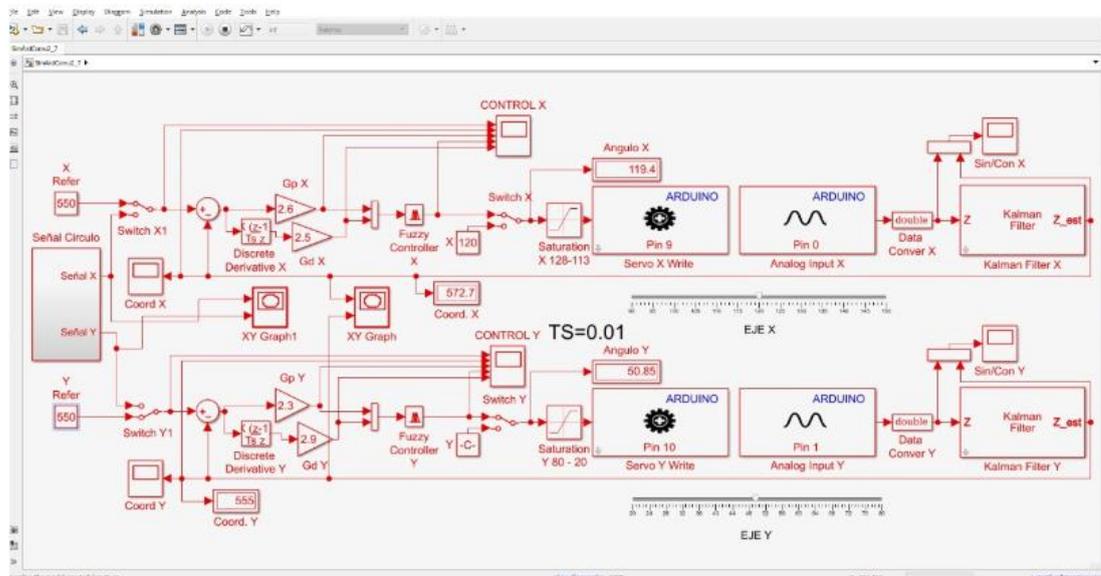


Figura 5. 9: Algoritmo de control FUZZY en tiempo real.

El resultado del error del controlador PID para la plataforma inercial de 2-GDL es de 2.27%.

Los algoritmos de control ayudan a realizar que el objeto sobre la pantalla se ubique en la referencia establecida, con ayuda del diseño adicional se realiza que el objeto sobre la pantalla sigue una trayectoria definida.

Para el control PID se diseña el seguimiento de un ovalo, se muestra la figura obtenida.

Realizado para el control PID.

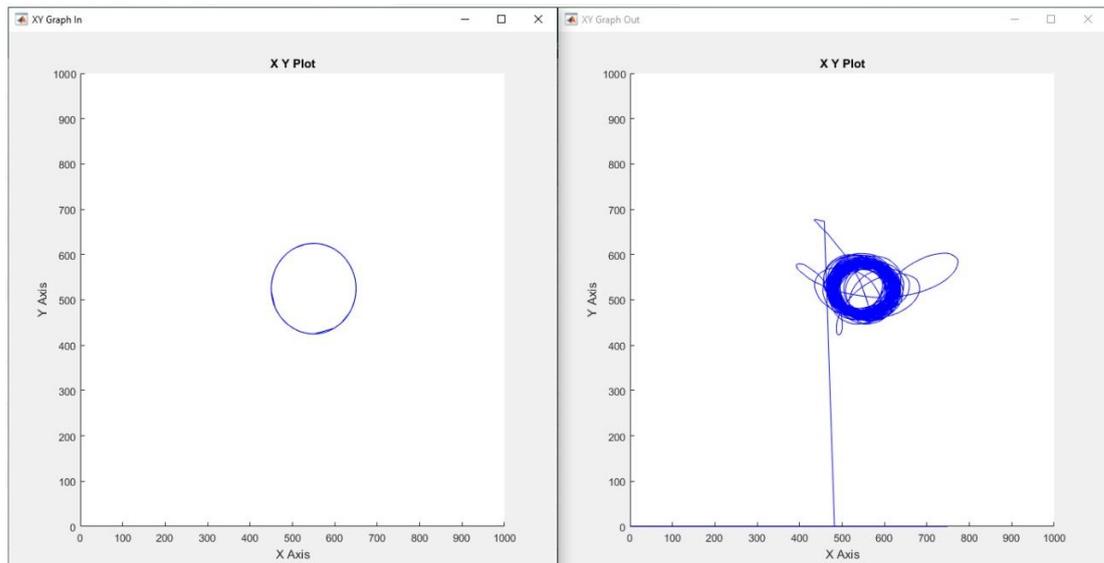


Figura 5. 10: Seguimiento de trayectoria con el controlador PID.

Realizado para el control FUZZY.

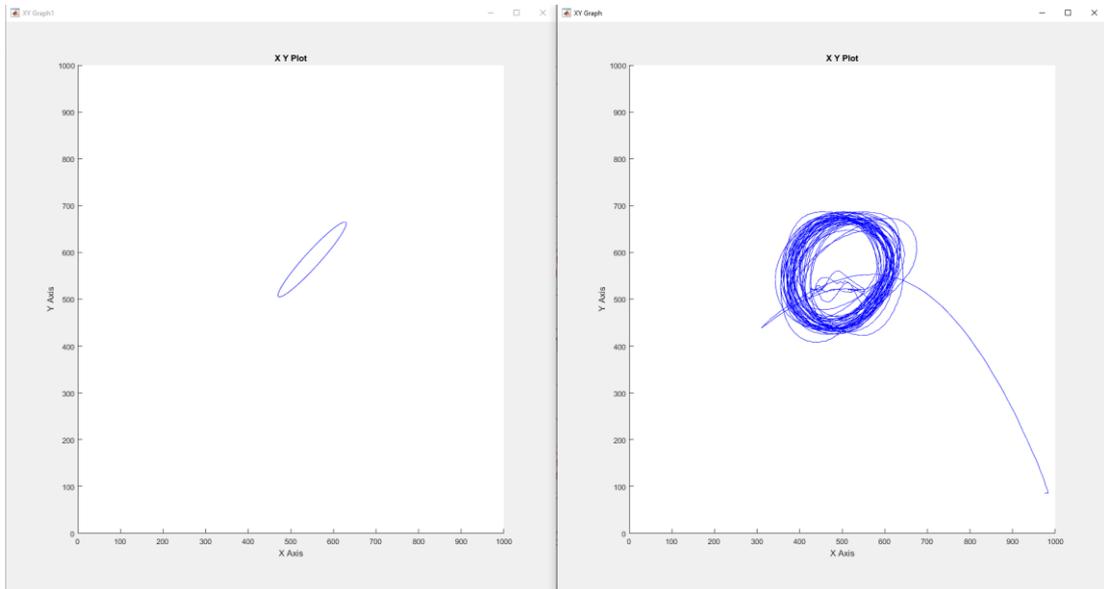


Figura 5. 11: Seguimiento de trayectoria con el controlador FUZZY.

Se procede a realizar el análisis de resultado con el cálculo del error RMS e índices de desempeño IAE e ISU con la obtención de los valores exportados anteriormente.

	RMSE	IAE	ISE
PID	51,2599	7,2555 x 10 ⁵	1,8117 x 10 ⁴
FUZZY	40,5092	4,4047 x 10 ⁵	8,4824 x 10 ³

Tabla 4: Comparativa del error RMS e índices de desempeño.

En la Tabla 4 se muestran los valores para la comparación entre el controlador FUZZY y PID. Se tiene la raíz del error cuadrático medio o RMSE por sus siglas en inglés, para obtener la precisión del sistema. Además, los índices de desempeño como son: el error integral absoluto o IAE por sus siglas en inglés y la desviación de señal de control cuadrado integral o ISE por sus siglas en inglés.

El RMSE se calcula con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^N (r_k - y_k)^2\right) / N}$$

Los valores RMSE calculados para los controladores PID y FUZZY están llegando a ser aproximadamente 51 y 41 respectivamente, lo que no está mal. Estos valores nos indican que el controlador FUZZY es más preciso que el controlador PID aplicado a la plataforma inercial de 2-GDL. Un buen sistema debe tener un valor RMSE inferior a 180. (Lima, Cajo, Huilcapi, & Agila, 2017)

$$IAE = \sum_{k=1}^N |r_k - y_k|$$

Aplicando la ecuación de IAE se obtiene que cuando actúa el controlador PID en el sistema de la plataforma inercial de 2-GDL, el IAE de este controlador es 7,2555 x 10³, pero cuando actúa el controlador FUZZY en el plato el IAE es 4,4047 x 10³. Dados estos valores se determina que el controlador FUZZY tiene un mejor seguimiento de la referencia para posicionar la esfera en el plato. (Lima et al., 2017)

$$ISU = \sum_{k=0}^N (u(k) - u_{ss})^2$$

Aplicando la ecuación de ISU se obtiene valores aproximados de la energía que utiliza cada controlador, con esto puede compararse e indicarse cuál es el que emplea menor energía en cada ciclo de trabajo. Por lo cual se muestra que el controlador FUZZY obtiene una mejora de rendimiento en la energía utilizada por tener el menor valor de ambos controladores.

ANÁLISIS DE RESULTADO

Para realizar un análisis del proyecto de graduación se realiza una exposición a estudiantes y docentes en la III jornada científica de electrónica y automatización 2019.



Figura 6. 1: III jornada científica de electrónica y automatización 2019.

A continuación de la conferencia se realiza una encuesta al grupo de los estudiantes y docentes para medir el grado de aceptación e interés de este proyecto de titulación. Con ayuda de los resultados de la encuesta realizada en la conferencia, se evidencia que el proyecto de titulación tiene un gran interés en los asistentes que son estudiantes y docentes de diversas carreras de la Universidad Politécnica Salesiana, creando un gran impacto en el desarrollo de investigación con la ayuda de la plataforma inercial de 2-GDL.

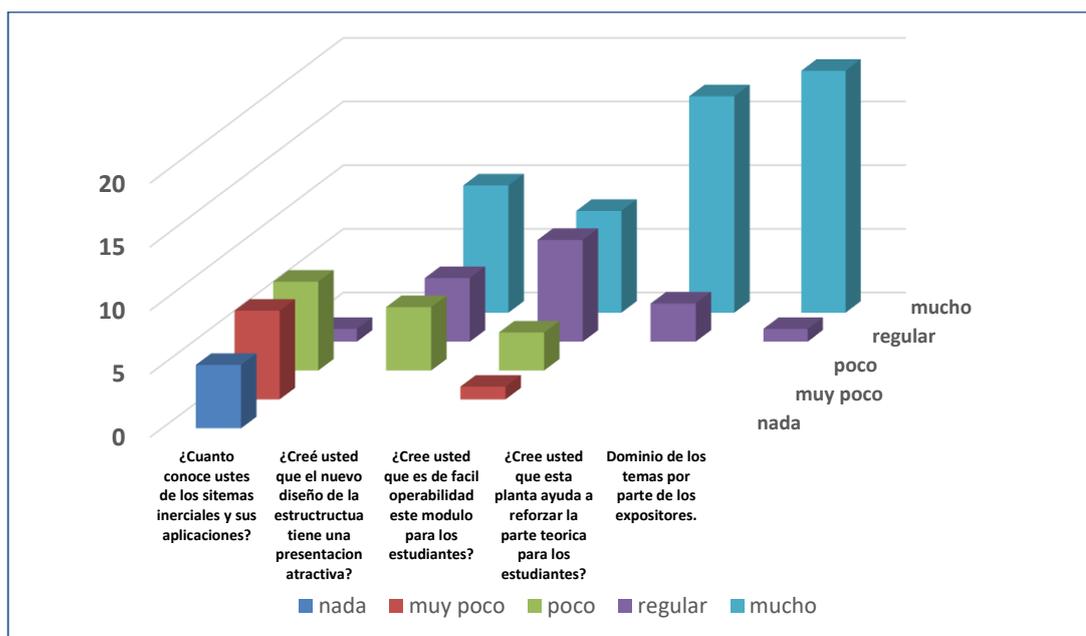


Figura 6. 2: Análisis de resultados.



TRABAJO DE TITULACION

TEMA: REPOTENCIACIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DEL LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES PID Y FUZZY A TRAVÉS DE MATLAB/SIMULINK.

AUTORES: JARA LOAIZA WILLIAM ANDRÉS
CHALACÁN AGUAYO VICENTE DANIEL

TUTOR: MSC. VICENTE PEÑARANDA

Encuesta anónima de percepción a un grupo de asistente en la III jornada científica de electrónica y automatización 2019 en la Universidad Politécnica Salesiana acerca del uso de la plataforma inercial de 2GDL utilizando 2 tipo de controladores PID y FUZZY respectivamente.

- Es estudiante la Universidad Politécnica Salesiana(Si, llenar a continuación los siguientes datos/No, saltarse esto paso para realizar la encuesta)_____
- Carrera:_____
- Ciclo que cursa el/la estudiante:_____
- Género(masculino/femenino):_____

Cómo calificar los siguientes aspectos de acuerdo a la siguiente ponderación, marcando la casilla correspondiente:

1. =nada.
2. =muy poco.
3. =poco.
4. =regular.
5. =mucho.

	nada	muy poco	poco	regular	mucho
¿Cuanto conoce usted de los sistemas inerciales y sus aplicaciones?					
¿Cree usted que el nuevo diseño de la estructura tiene una presentación atractiva?					
¿Cree usted que es de fácil operabilidad este modulo para los estudiantes?					
¿Cree usted que esta planta ayuda a reforzar la parte teorica para los estudiantes?					
Dominio de los temas por parte de los expositores.					

Figura 6. 3: Formato de encuesta.

CONCLUSIONES

- Con ayuda del diagnóstico realizado a las partes mecánicas y electrónicas se logra reemplazar los elementos defectuosos o discontinuado de la plataforma inercial de 2-GDL.
- Con la ayuda del Software Matlab (ident) se obtiene el modelo del sistema por cada grado de libertad.
- Se realiza una guía de 9 prácticas gracias al correcto funcionamiento de la plataforma inercial de 2-GDL utilizando los controladores PID y FUZZY
- Con los índices de desempeño se tiene que el controlador FUZZY tiene un mejor rendimiento en la energía utilizada y un mejor seguimiento de la referencia para posicionar la esfera en el plato, sobre el controlado PID aplicado al sistema de esta planta.
- Con ayuda de los resultados obtenidos al analizar los controladores aplicados a la plataforma inercial de 2-GDL desarrollados en este trabajo de titulación se determina que el controlador FUZZY en comparación al controlador PID y cuenta con un porcentaje de error RMS 40.5092 siendo este más preciso al compararlo con el controlador PID que tiene un porcentaje de error 51.2999.
- El controlador PID se puede utilizar a pesar de contar un porcentaje de error mayor que el controlador FUZZY, ya que las características de respuesta se encuentran dentro de los rangos aceptables para la utilización de un controlador.
- Se añade un PD al controlador FUZZY para lograr alcanzar los resultados deseados y se obtiene un controlador automático PD DIFUSO.
- Al diseñar el controlador FUZZY se determina que las reglas de correspondencia son iguales tanto para el algoritmo de FUZZY en el eje X y el eje Y, con dichas reglas el controlador opera correctamente.
- Gracias a la tarjeta Arduino DUE se logran diseñar sin ningún problema los controladores PID y FUZZY y se concluye que esta tarjeta tiene un excelente desempeño para la comunicación con el software Matlab/Simulink.
- Con la ayuda de la tarjeta PCB, los servomotores, la pantalla táctil resistiva y la repotenciación física de la plataforma inercial de 2-GDL. Se logra obtener una planta didáctica fácil de transportar y de bajo costo, donde se ejecutan los controladores PID y FUZZY en el software Matlab/Simulink de forma sencilla.
- Gracias a la característica de los elementos implementados en la plataforma inercial de 2-GDL tarjeta PCB en los siguientes trabajos de titulación se puede experimentar con diferentes algoritmos de control.

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar pruebas con la plataforma inercial de 2-GDL verificar que el botón de paro de emergencia no esté pulsado.
- Utilizar una esfera que pese entre 92 a 96 gramos para un correcto funcionamiento de la plataforma inercial de 2-GDL.
- Se recomienda que la plataforma inercial de 2-GDL este en un lugar libre de humedad y polvo en exceso.
- Se debe realizar mantenimientos preventivos a la plataforma inercial de 2-GDL proporcionalmente se le de uso.
- Se recomienda utilizar un cable USB macho-macho de 3.0 con supresor de ruido para la comunicación entre la plataforma inercial de 2-GDL y la computadora utilizada.
- Utilizar procesadores core i7 para un correcto funcionamiento del controlador FUZZY.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcívar Cevallos, V. I., & Parrales Duarte, I. T. (2015). *Diseño e implementación de una plataforma inercial de dos grados de libertad y evaluación del modelado matemático a través de matlab/simulink*. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10426>
- Aparicio, M. P. (2010). *Diseño y desarrollo de circuitos impresos con KiCad*. RC Libros.
- Área Tecnología. (2016). RELES. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/rele.html>
- Artero, Ó. T. (2013). *ARDUINO. Curso práctico de formación*. RC Libros.
- Cajo, R., & Agila, W. (2015). Evaluation of Algorithms for Linear and Nonlinear PID Control for Twin Rotor MIMO System. *2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering*, 214-219. <https://doi.org/10.1109/APCASE.2015.45>
- Cárdenas Ibáñez, M. D. L. A., & Peñaranda Idrovo, V. (2019). *Análisis comparativo de algoritmos de control pid, fuzzy y predictivo aplicado a sistemas seguidores de la posición del sol para la captación de energía solar usando paneles fotovoltaicos*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46062>
- Castillo, J. C. M. (2017). *Electrónica. Novedad 2017*. Editex.
- Cruz-Oré, D. L., & Luis, J. (2013). ¿Qué significan los grados de libertad? *Revista Peruana de Epidemiología*, 17(2). Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=203129458002>
- Delgado Crespo, M. (2016). Arduino en español: Arduino DUE. Recuperado de Arduino en español website: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/arduino-due.html>
- Direct Industry. (2019). Líder de mundo en servomotores y motores de pasos

- integrados. JVLDirectIndustry. Recuperado de
<http://trends.directindustry.es/jvl-s/project-22516-126937.html>
- Echeverría, P. M., Angulo, I., & Angulo, J. M. (2008). *Pantallas táctiles para mejorar la presentación y el funcionamiento de nuestros productos*. 4.
- El Arduino. (2019, febrero 17). El Arduino NANO. Características de la placa Arduino NANO. Recuperado 4 de julio de 2019, de El Arduino website:
<https://www.elarduino.com/nano/>
- GOILAV, N., & LOI, G. (2016). *Arduino: Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes*. Ediciones ENI.
- Gómez, E. (2017, diciembre 19). Que es PWM y para qué sirve. Recuperado de Rincón Ingenieril website: <https://www.rinconingenieril.es/que-es-pwm-y-para-que-sirve/>
- Harper, G. E. (2005). *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. Editorial Limusa.
- Huilcapi Subía, V. M. (2015). *Diseño de un algoritmo de control inteligente utilizando lógica difusa comparado con un algoritmo PID, para su implementación en un sistema multivariable no lineal bola y plato*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/30110>
- Ibarra, R., & López, M. S. (2007). *Principios de Teoría de Las Comunicaciones*. Editorial Limusa.
- Idis, D. (1996). 6DOF | IDIS. Recuperado de 6dof website:
<https://proyectoidis.org/6dof/>
- Lima, B., Cajo, R., Huilcapi, V., & Agila, W. (2017). Modeling and comparative study of linear and nonlinear controllers for rotary inverted pendulum. *Journal of Physics: Conference Series*, 783, 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/783/1/012047>
- MathWorks. (2019). MATLAB Product Description-MATLAB & Simulink.

Recuperado de MATLAB Product Description website:

https://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

Matos, J. F. B., Rodríguez, R. A. J., & Toledo, D. R. G. (2018). Matlab/Simulink: Modelos para simular mediciones eléctricas en circuitos r, rl y rlc monofásicos. *Roca: Revista Científico - Educaciones de la provincia de Granma*, 14(2 (abril-junio)), 102-115.

Mecafenix, F. (2017, abril 18). Servomotor ¿Qué es y cómo funciona? Recuperado 24 de junio de 2019, de Ingeniería Mecafenix website:

<https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/>

Millahual, C. P. (2017). *Arduino - De Cero a Experto: Proyectos Prácticos - Electrónica, hardware y programación*. RedUsers.

Naylamp, M. (2018). Arduino DUE R3. Recuperado 4 de julio de 2019, de Naylamp Mechatronics-Perú website: <https://naylampmechatronics.com/arduino-tarjetas/172-arduino-due-r3.html>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

Olmo Nave. (2017). Filter Circuits with Capacitors. Recuperado de

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/filcap2.html#c3>

Pardo, C. (2013). Controlador PID-Control Automático-Picuno. Recuperado de

<https://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.

Roederer, J. G. (2002). *Mecánica Elemental*. Editorial Universitaria de Buenos Aires SEM.

Rubio, F. R., Ortega, M. G., & Gordillo, F. (2010). Control de Posición e Inercial de Plataforma de Dos Grados de Libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(4), 65-73.

[https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70061-3](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70061-3)

Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I.-B. (2009). *Process Identification and PID Control*.

John Wiley & Sons.

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación.

ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS DE DATOS GENERADOS DE LA SEÑAL PRBS

Motor X	
Tiem	Grad
1	114
2	114
3	114
4	114
5	114
6	114
7	114
8	114
9	114
10	126
11	126
12	126
13	126
14	114
15	114
16	114
17	114
18	126
19	114
20	114
21	114
22	126
23	126
24	126
25	126
26	114
27	126
28	114
29	114
30	126
31	126
32	114
33	114
34	126
35	114
36	114
37	126
38	114
39	114
40	114
41	114
42	126
43	114
44	126
45	126
46	126
47	126

48	114
49	114
50	114
51	126
52	126
53	114
54	114
55	126
56	126
57	126
58	126
59	114
60	126
61	126
62	114
63	126
64	126
65	126
66	114
67	126
68	114
69	126
70	114
71	114
72	114
73	126
74	114
75	126
76	114
77	114
78	114
79	114
80	126
81	126
82	114
83	126
84	126
85	114
86	126
87	114
88	114
89	114
90	126
91	126
92	114
93	114
94	114
95	126
96	126

97	126
98	126
99	126
100	126
101	114
102	114
103	114
104	126
105	114
106	114
107	114
108	126
109	114
110	126
111	126
112	114
113	114
114	114
115	114
116	126
117	114
118	126
119	114
120	126
121	126
122	114
123	126
124	114
125	126
126	126
127	126
128	126
129	126
130	126
131	114
132	126
133	114
134	126
135	114
136	126
137	114
138	126
139	114
140	114
141	114
142	114
143	114
144	126
145	114

146	126
147	114
148	114
149	126
150	114
151	126
152	126
153	126
154	126
155	126
156	114
157	114
158	126
159	114
160	114
161	114
162	126
163	114
164	114
165	126
166	114
167	114
168	126
169	114
170	126
171	114
172	114
173	126
174	126
175	126
176	126
177	126
178	114
179	126
180	114
181	114
182	114
183	126
184	114
185	114
186	114
187	114
188	114
189	126
190	126
191	126
192	114
193	114
194	114

195	114
196	126
197	126
198	114
199	114
200	126
201	114
202	126
203	126
204	114
205	114
206	126
207	114
208	126
209	114
210	114
211	114
212	126
213	126
214	126
215	114
216	114
217	126
218	114
219	126
220	126
221	126
222	114
223	126
224	114
225	114
226	114
227	114
228	114
229	114
230	114
231	126
232	114
233	126
234	126
235	114
236	126
237	114
238	114
239	126
240	126
241	126
242	114
243	126
244	114
245	126
246	126
247	114

248	114
249	126
250	126
251	126
252	114
253	114
254	126
255	126
256	126
257	126
258	126
259	126
260	126
261	114
262	114
263	126
264	126
265	114
266	114
267	126
268	126
269	114
270	126
271	114
272	126
273	114
274	114
275	126
276	126
277	114
278	126
279	126
280	114
281	114
282	114
283	114
284	114
285	114
286	126
287	114
288	114
289	126
290	114
291	126
292	126
293	114
294	126
295	126
296	114
297	126
298	126
299	114
300	114

301	126
302	114
303	114
304	114
305	114
306	114
307	114
308	126
309	126
310	114
311	126
312	114
313	114
314	126
315	114
316	126
317	114
318	126
319	126
320	126
321	126
322	114
323	126
324	114
325	126
326	126
327	126
328	114
329	126
330	126
331	114
332	114
333	114
334	126
335	114
336	114
337	126
338	126
339	114
340	126
341	114
342	114
343	114
344	114
345	126
346	114
347	114
348	126
349	126
350	126
351	126
352	114
353	114

354	126
355	114
356	126
357	114
358	126
359	114
360	126
361	126
362	114
363	114
364	114
365	126
366	126
367	114
368	126
369	126
370	126
371	126
372	114
373	114
374	126
375	126
376	126
377	114
378	126
379	126
380	126
381	126
382	114
383	126
384	126
385	126
386	126
387	126
388	126
389	126
390	126
391	114
392	126
393	126
394	126
395	114
396	126
397	126
398	126
399	114
400	114
401	126
402	126
403	114
404	126
405	126
406	126

407	114
408	114
409	114
410	126
411	114
412	126
413	114
414	126
415	114
416	114
417	126
418	114
419	114
420	126
421	126
422	126
423	114
424	114
425	114
426	126
427	126
428	126
429	114
430	126

431	126
432	114
433	126
434	114
435	126
436	114
437	126
438	126
439	126
440	114
441	114
442	126
443	114
444	114
445	126
446	126
447	114
448	114
449	114
450	114
451	114
452	126
453	126
454	114

455	114
456	114
457	114
458	126
459	126
460	126
461	114
462	126
463	114
464	114
465	126
466	114
467	114
468	114
469	126
470	126
471	114
472	126
473	114
474	126
475	126
476	114
477	126
478	126

479	126
480	126
481	126
482	114
483	126
484	126
485	114
486	114
487	126
488	126
489	114
490	114
491	114
492	126
493	114
494	126
495	126
496	126
497	114
498	114
499	114
500	114

Tabla 5: Datos generados de la señal PRBS-Motor X.

Motor Y	
Tiempo	Grados
1	47,5
2	47,5
3	47,5
4	47,5
5	47,5
6	47,5
7	47,5
8	47,5
9	47,5
10	52,5
11	52,5
12	52,5
13	52,5
14	47,5
15	47,5
16	47,5
17	47,5
18	52,5
19	47,5
20	47,5
21	47,5
22	52,5
23	52,5

24	52,5
25	52,5
26	47,5
27	52,5
28	47,5
29	47,5
30	52,5
31	52,5
32	47,5
33	47,5
34	52,5
35	47,5
36	47,5
37	52,5
38	47,5
39	47,5
40	47,5
41	47,5
42	52,5
43	47,5
44	52,5
45	52,5
46	52,5
47	52,5
48	47,5

49	47,5
50	47,5
51	52,5
52	52,5
53	47,5
54	47,5
55	52,5
56	52,5
57	52,5
58	52,5
59	47,5
60	52,5
61	52,5
62	47,5
63	52,5
64	52,5
65	52,5
66	47,5
67	52,5
68	47,5
69	52,5
70	47,5
71	47,5
72	47,5
73	52,5

74	47,5
75	52,5
76	47,5
77	47,5
78	47,5
79	47,5
80	52,5
81	52,5
82	47,5
83	52,5
84	52,5
85	47,5
86	52,5
87	47,5
88	47,5
89	47,5
90	52,5
91	52,5
92	47,5
93	47,5
94	47,5
95	52,5
96	52,5
97	52,5
98	52,5

99	52,5
100	52,5
101	47,5
102	47,5
103	47,5
104	52,5
105	47,5
106	47,5
107	47,5
108	52,5
109	47,5
110	52,5
111	52,5
112	47,5
113	47,5
114	47,5
115	47,5
116	52,5
117	47,5
118	52,5
119	47,5
120	52,5
121	52,5
122	47,5
123	52,5
124	47,5
125	52,5
126	52,5
127	52,5
128	52,5
129	52,5
130	52,5
131	47,5
132	52,5
133	47,5
134	52,5
135	47,5
136	52,5
137	47,5
138	52,5
139	47,5
140	47,5
141	47,5
142	47,5
143	47,5
144	52,5
145	47,5
146	52,5
147	47,5
148	47,5
149	52,5

150	47,5
151	52,5
152	52,5
153	52,5
154	52,5
155	52,5
156	47,5
157	47,5
158	52,5
159	47,5
160	47,5
161	47,5
162	52,5
163	47,5
164	47,5
165	52,5
166	47,5
167	47,5
168	52,5
169	47,5
170	52,5
171	47,5
172	47,5
173	52,5
174	52,5
175	52,5
176	52,5
177	52,5
178	47,5
179	52,5
180	47,5
181	47,5
182	47,5
183	52,5
184	47,5
185	47,5
186	47,5
187	47,5
188	47,5
189	52,5
190	52,5
191	52,5
192	47,5
193	47,5
194	47,5
195	47,5
196	52,5
197	52,5
198	47,5
199	47,5
200	52,5

201	47,5
202	52,5
203	52,5
204	47,5
205	47,5
206	52,5
207	47,5
208	52,5
209	47,5
210	47,5
211	47,5
212	52,5
213	52,5
214	52,5
215	47,5
216	47,5
217	52,5
218	47,5
219	52,5
220	52,5
221	52,5
222	47,5
223	52,5
224	47,5
225	47,5
226	47,5
227	47,5
228	47,5
229	47,5
230	47,5
231	52,5
232	47,5
233	52,5
234	52,5
235	47,5
236	52,5
237	47,5
238	47,5
239	52,5
240	52,5
241	52,5
242	47,5
243	52,5
244	47,5
245	52,5
246	52,5
247	47,5
248	47,5
249	52,5
250	52,5
251	52,5

252	47,5
253	47,5
254	52,5
255	52,5
256	52,5
257	52,5
258	52,5
259	52,5
260	52,5
261	47,5
262	47,5
263	52,5
264	52,5
265	47,5
266	47,5
267	52,5
268	52,5
269	47,5
270	52,5
271	47,5
272	52,5
273	47,5
274	47,5
275	52,5
276	52,5
277	47,5
278	52,5
279	52,5
280	47,5
281	47,5
282	47,5
283	47,5
284	47,5
285	47,5
286	52,5
287	47,5
288	47,5
289	52,5
290	47,5
291	52,5
292	52,5
293	47,5
294	52,5
295	52,5
296	47,5
297	52,5
298	52,5
299	47,5
300	47,5
301	52,5
302	47,5

303	47,5
304	47,5
305	47,5
306	47,5
307	47,5
308	52,5
309	52,5
310	47,5
311	52,5
312	47,5
313	47,5
314	52,5
315	47,5
316	52,5
317	47,5
318	52,5
319	52,5
320	52,5
321	52,5
322	47,5
323	52,5
324	47,5
325	52,5
326	52,5
327	52,5
328	47,5
329	52,5
330	52,5
331	47,5
332	47,5
333	47,5
334	52,5
335	47,5
336	47,5
337	52,5
338	52,5
339	47,5
340	52,5
341	47,5
342	47,5
343	47,5
344	47,5
345	52,5
346	47,5
347	47,5
348	52,5
349	52,5
350	52,5
351	52,5
352	47,5
353	47,5

354	52,5
355	47,5
356	52,5
357	47,5
358	52,5
359	47,5
360	52,5
361	52,5
362	47,5
363	47,5
364	47,5
365	52,5
366	52,5
367	47,5
368	52,5
369	52,5
370	52,5
371	52,5
372	47,5
373	47,5
374	52,5
375	52,5
376	52,5
377	47,5
378	52,5
379	52,5
380	52,5
381	52,5
382	47,5
383	52,5
384	52,5
385	52,5
386	52,5
387	52,5
388	52,5
389	52,5
390	52,5
391	47,5
392	52,5
393	52,5
394	52,5
395	47,5
396	52,5
397	52,5
398	52,5
399	47,5
400	47,5
401	52,5
402	52,5
403	47,5
404	52,5

405	52,5
406	52,5
407	47,5
408	47,5
409	47,5
410	52,5
411	47,5
412	52,5
413	47,5
414	52,5
415	47,5
416	47,5
417	52,5
418	47,5
419	47,5
420	52,5
421	52,5
422	52,5
423	47,5
424	47,5
425	47,5
426	52,5
427	52,5
428	52,5
429	47,5
430	52,5
431	52,5
432	47,5
433	52,5
434	47,5
435	52,5
436	47,5
437	52,5
438	52,5
439	52,5
440	47,5
441	47,5
442	52,5
443	47,5
444	47,5
445	52,5
446	52,5
447	47,5
448	47,5
449	47,5
450	47,5
451	47,5
452	52,5
453	52,5
454	47,5
455	47,5

456	47,5
457	47,5
458	52,5
459	52,5
460	52,5
461	47,5
462	52,5
463	47,5
464	47,5
465	52,5
466	47,5
467	47,5
468	47,5
469	52,5
470	52,5
471	47,5
472	52,5
473	47,5
474	52,5
475	52,5
476	47,5
477	52,5
478	52,5
479	52,5
480	52,5
481	52,5
482	47,5
483	52,5
484	52,5
485	47,5
486	47,5
487	52,5
488	52,5
489	47,5
490	47,5
491	47,5
492	52,5
493	47,5
494	52,5
495	52,5
496	52,5
497	47,5
498	47,5
499	47,5
500	47,5

Tabla 6: Datos generados de la señal PRBS-Motor Y.

ANEXO 2: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Nombre del trabajo:	Repotenciamiento de la plataforma inercial del laboratorio de control automático utilizando controladores PID y fuzzy a través de MATLAB/SIMULINK.																									
Actividad	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	ago-18	sep-18	oct-18	nov-18	dic-18	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	
Revisión de Partes mecánicas y electrónicas																										
Experimentación con la plataforma inercial																										
Compra e importación de motores y pantalla																										
Rediseño de partes mecánicas																										
Montaje de motores y pruebas de movimiento																										
Experimentación del controlador PID para la plataforma inercial																										
Definir el modelo del sistema empleando "ident" en Matlab/Simulink																										
Investigación de lógica difusa																										
Experimentación del controlador FUZZY para la plataforma inercial																										
Diseño de la guía de prácticas																										
Pruebas y verificación de la guía de prácticas																										
Documentación del proyecto																										
Revisión técnica																										

ANEXO 3: PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR
1	Servomotores Fan Model 20 Kg	\$ 47,98
2	Pantalla táctil resistiva 4 wire	\$ 60,99
3	Esferas de 1 pulg. y 1.5 pulg.	\$ 15,00
4	Rediseño de estructura mecánica	\$350,00
5	Soportes de teflón	\$ 30,00
6	Brazos metálicos para servomotores	\$ 20,00
7	Tarjeta de Circuito Impreso	\$ 80,00
8	Arduino DUE	\$ 45,00
9	Arduino NANO	\$ 15,00
10	Botoneras y luces piloto	\$ 15,00
11	Fuente de poder	\$ 8,00
12	Varios (movilización, material didáctico, papelería)	\$ 300,00
13	Costos de importación	\$ 40,81
14	Mano de obra	\$ 350,00
TOTAL		\$ 1.377,78

ANEXO 4: FACTURAS DE EQUIPOS Y ELEMENTOS VARIOS



VILCONSA S.A.
GUAYAQUIL - ECUADOR
SERVICIO DE BUSQUEDA INTERNACIONAL
06/03/2019

IMPORTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES
ELECTRÓNICOS, TELEFONÍA, AUTOPARTES Y COMPUTACIÓN
VENTAS AL POR MAYOR Y MENOR
R.U.C. 0992330465001
F. Paula Icaza #704 y Boyard - Telef.: 042-300318 - Cel.: 0981005982
www.vilconsa.com - E-mail: vilconsa_sa@hotmail.com
divalimport@hotmail.com - msm: vilconsa_sa@hotmail.com
Guayaquil - Ecuador

Nº DE AUTORIZACIÓN S.R.L.1124315455
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: SI
FACTURA
001-002-00 0061490
DOCUMENTO CATEGORIZADO: NO
FECHA DE AUTORIZACIÓN: 18 FEBRERO 2019

Fecha: JARA LOAIZA WILLIAM ANDRES
 Cliente: CDLA LA CHALA
 Dirección: 0926210634
 R.U.C./C.I.: _____ Teléfono: _____

CANT.	ID	DESCRIPCIÓN	P. UNIT.	TOTAL
2	11225	LM358P...	0.670	1.339
4	80	100 UF 16V 105 ...	0.134	0.536
4	120	22 UF 16V...	0.134	0.536
2	11904	RESISTENCIA DE ALAMBRE DE 1KOHM D...	0.089	0.179
1	8553	JUMPER MACHO A MACHO 10CM 30 PIN ...	1.116	1.116
1	5800	PORTAFUSIBLE GRANDE 250V/10A AMER...	0.446	0.446
3	7339	FUSIBLE AMERICANO 6X30MM 2AMP 250...	0.179	0.536
*****		Son 7 articulos despachados	*****	*****

VILCONSA S.A.
CANCELADO

FORMA DE PAGO	Total: cinco con 25/100 Dolares	SUB-TOTAL \$
EFFECTIVO	Son: _____ Dólares.	4.688
DINERO		I.V.A. 0 %
ELECTRÓNICO		0.563
TARJETA DE		TOTAL \$
CRÉDITO DÉBITO		5.25
TRANSF./CHEQUE/		
OTROS		

HARO MUÑOZ MONICA DEL ROCIO • Imp. Geoconda • R.U.C. 3601998073801 • AUT. 13747 • Tel. 0986244228 - 2370907
 10 B. 100X2 del 6100 IAL 82000 • VALIDO PARA SU EMISIÓN HASTA • 18 FEBRERO 2020

ORIGINAL: ADQUIRENTE
COPIA: EMISOR



Final Details for Order #114-9904307-3602667

[Print this page for your records.](#)

Order Placed: August 10, 2018
Amazon.com order number: 114-9904307-3602667
Order Total: \$99.99

Shipped on August 12, 2018	
Items Ordered	Price
1 of: NJYTouch 15inch 4 Wire Resistive Touch Screen Panel 322x247mm For 15" Laptop LCD Screen Sold by: NJYTouch (seller profile) Condition: New	\$60.99
Shipping Address: TMA01194 JORGE GARCIA 8276 NW SOUTH RIVER DR MEDLEY, FL 33166-7420 United States	Item(s) Subtotal: \$60.99 Shipping & Handling: \$39.00 ----- Total before tax: \$99.99 Sales Tax: \$0.00 -----
Shipping Speed: Expedited Shipping	Total for This Shipment: \$99.99 -----



Final Details for Order #114-6536629-3054651

[Print this page for your records.](#)

Order Placed: August 10, 2018
Amazon.com order number: 114-6536629-3054651
Order Total: \$108.57

Shipped on August 16, 2018	
Items Ordered	Price
2 of: Fan Model FS-20W Waterproof High Torque Metal Gear Standard Digital Servo 20KG/.14S for 1/8 1/10 scale RC Cars Sold by: Fan Model (seller profile) Condition: New	\$23.99
1 of: JINGRAYS 6mm Thick Curb Chain Necklace for Men Biker Punk Style, Male Stainless Steel Chain Link, 24 inches -Silver Sold by: JINGRAYS (seller profile) Condition: New	\$9.99
1 of: Tonnier Black Slim Stainless Steel Mesh Strap Mens Watch Quartz Watch for Men Golden Hands, Tonnier Sold by: tongnianfield (seller profile) Product question? Ask Seller Condition: New	\$22.99
1 of: Tommy Hilfiger Men's Dore Passcase Billfold Wallet, British Tan, One Size Sold by: Amazon.com Services, Inc Condition: New	\$25.80
Shipping Address: TMA01194 JORGE GARCIA 8276 NW SOUTH RIVER DR MEDLEY, FL 33166-7420 United States	Item(s) Subtotal: \$106.76 Shipping & Handling: \$7.92 Free Shipping: -\$7.92 ----- Total before tax: \$106.76 Sales Tax: \$1.81 -----
Shipping Speed: FREE Shipping	Total for This Shipment: \$108.57 -----

ANEXO 5: DATASHEET PANTALLA TACTIL RESISTIVA

