

CONTROL DE POSICION MULTILAZO EN UN SISTEMA DE BALANCE BALL
AND BEAM

AUTOR

SAMIR LEONARDO ASPRILLA REYES

HERNANDO RANGEL ANGARITA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEPARTAMENTO MMI

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

VILLA DEL ROSARIO, Junio 04 2022

CONTROL DE POSICION MULTILAZO EN UN SISTEMA DE BALANCE BALL
AND BEAM

AUTOR

SAMIR LEONARDO ASPRILLA REYES

HERNANDO RANGEL ANGARITA

DIRECTOR :

MSc. JAIR ELIAS ARAUJO VARGAS

CODIRECTOR :

MSc. OSCAR MANUEL DUQUE

INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEPARTAMENTO MMI

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

VILLA DEL ROSARIO, Junio 04 2022

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Cúcuta, Norte de Santander. 4 de junio de 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y permitirnos continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres que siempre han estado en los momentos buenos y malos, para aconsejarnos y darnos su apoyo incondicional, motivándonos cada día a ser mejores.

A nuestros hermanos, los cuales con su apoyo nos motivan a ser mejores personas.

A nuestros docentes que con sus conocimientos logran crear bases importantes para afrontar cada situación tanto en el ámbito personal como laboral.

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.

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por darnos la oportunidad de terminar esta etapa de nuestra vida profesional, a nuestros padres que nos han acompañado en este camino profesional y han sabido darnos un buen ejemplo de trabajo y honradez.

Agradecemos a nuestros amigos y compañeros, quienes nos han brindado su apoyo y han estado en las etapas difíciles de la carrera.

También queremos agradecer a la Universidad de Pamplona, a toda la facultad de Ingeniería, a nuestros profesores, quienes con sus conocimientos hicieron que creyéramos día a día como profesionales, gracias a cada uno por su gran dedicación y apoyo.

Y por último queremos expresar nuestro agradecimiento al Msc. Jair Elías Araujo director y al Msc. Oscar Manuel Duque codirector, quienes con sus conocimientos y enseñanzas permitieron el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

GLOSARIO	31
RESUMEN.....	33
1. INTRODUCCIÓN.....	34
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION	35
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	35
2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	35
3. DELIMITACIÓN.....	37
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	37
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
CAPITULO 1	38
4. ESTADO DEL ARTE	38
4.1. ANTECEDENTES.....	38
4.1.1. Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi	38
4.1.2. El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de robótica	39
4.1.3. Planificación de movimiento de bola en placa para robots de seis patas paralelas para caminar en terrenos irregulares utilizando información háptica pura	41
4.1.4. Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos	42
4.1.5. El control de posición del sistema ball and beam utilizando el control de modo de deslizamiento difuso adaptativo basado en la observación de perturbaciones de estado en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes.....	44
4.1.6. Diseño de controlador fraccional de dos grados de libertad: aplicación al sistema de bolas y vigas	45
4.1.7. Control de vibración de una viga flexible impulsada por una etapa de husillo de bolas con filtros de muesca adaptables y un mejorador de línea.....	46
4.1.8. Estabilidad del sistema de control basado en ADRC no lineal de datos muestreados con aplicación al problema de la viga esférica.....	47
4.1.9. Equilibrio de bola y viga impulsada por una aleación con memoria de forma: posible actuador para un control estabilizado	49

4.1.10.	Modelado y control del sistema de bolas y vigas utilizando un controlador PID basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM).....	50
4.2.	MARCO TEÓRICO	51
4.2.1.	Arduino.....	51
4.2.2.	Matlab.....	52
4.2.3.	Teorema de Nyquist	53
4.2.4.	HMI.....	53
4.2.5.	Aplicación de algoritmos de control clásico, adaptable y robusto a sistemas dinámicos de parámetros variables	54
4.2.6.	Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos.....	56
4.2.7.	Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces	57
4.2.8.	Análisis y diseño de sistemas de control por el método de la respuesta en frecuencia.....	58
4.2.9.	Diagramas de Bode	59
4.2.10.	Diseño de controladores PID mediante el método de respuesta en frecuencia.....	60
4.3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS BALL AND BEAM	62
4.3.1.	Tipo de control.....	66
4.3.2.	Tipo de microprocesador.....	67
4.3.3.	Tipo de actuador.....	68
4.3.4.	Tipo de sensórica	69
	CAPITULO 2	70
5.	INGENIERIA CONCEPTUAL Y DE DETALLE.....	70
5.1.	INGENIERIA CONCEPTUAL.....	70
5.1.2.	Protocolos de comunicación.....	71
5.1.2.1.	Protocolo de comunicación serie o serial.....	71
5.1.2.1.1.	Comunicación Serial Síncrona	71
5.1.2.1.2.	Comunicación Serial Asíncrona	71
5.1.2.2.	UART (Universal Asynchronous Receiver - Transmitter)	71
5.1.3.	Norma ISA 101	72
5.1.4.	Conexión Universal Serial Bus	72
5.2.	INGENIERIA DE DETALLE	73

5.2.1.	Matriz de selección del material de las bases	73
5.2.2.	Matriz de selección del carril o viga y su soporte	75
5.2.3.	Matriz de selección del sensor de posición.....	77
5.2.4.	Matriz de selección del servomotor	78
5.2.5.	Matriz de selección pantalla HMI	81
5.2.6.	Matriz de selección del material para soporte del actuador	82
5.2.7.	Matriz de selección de dispositivo microcontrolador	84
5.2.8.	Matriz de selección de las varillas del sistema ball and beam forma manual 85	
5.2.9.	Matriz de selección del material de las bases del sistema Ball and beam forma manual y el objeto de medición del carro	87
5.2.10.	Matriz de selección del soporte y carcasas de sensores.....	88
5.2.11.	Matriz de selección del sensor de distancia manual	90
5.2.12.	Matriz de selección de la cámara.....	91
CAPITULO 3		93
6.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA BALL AND BEAM	93
6.1.	CAD DEL SISTEMA BALL AND BEAM	93
6.2.	CIRCUITOS ELECTRONICO.....	94
6.3.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA BALL AND BEAM 96	
CAPITULO 4		117
7.	MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA “BALL AND BEAM”	117
7.1.	MODELADO DEL PROCESO	117
7.2.	MODELADO DEL XYZROBOT SMART SERVO A1-16	120
7.3.	MODELADO DEL TRANSMISOR PARA SENSOR ULTRASONICO	125
7.4.	MODELADO DEL TRANSMISOR PARA POTENCIOMETRO.....	128
8.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	131
9.	DISEÑO DE CONTROLADORES PARA EL SISTEMA BALL AND BEAM EN TIEMPO CONTINUO	140
9.1.	DISEÑO DE CONTROLADORES CON SENSOR ULTRASONICO	140
9.1.1.	Controlador PID por segundo método de Z&N.....	140
9.1.2.	Controlador PD por método Tuning	144
9.1.3.	Controlador PID por método Tuning	147

9.1.4.	Validación de la metodología implementada para controladores obtenidos.	151
9.1.4.1.	Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control	152
9.1.4.1.1.	Puesta del sistema de control PID por segundo método de Z&N en simulación de la planta	152
9.1.4.1.2.	Puesta del sistema de control PD por Tuning en simulación de la planta	153
9.1.4.1.3.	Puesta del sistema de control PID Tuning en simulación de la planta	154
9.1.4.2.	Validación estadística de los resultados	155
9.1.4.2.1.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por segundo método Z&N	155
9.1.4.2.2.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID por segundo método Z&N	161
9.1.4.2.3.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning	163
9.1.4.2.4.	Estudio del régimen estable del sistema de control PD por Tuning	168
9.1.4.2.5.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning	173
9.1.4.2.6.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por Tuning	175
9.1.4.2.7.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID por Tuning ...	181
9.2.	DISEÑO DE CONTROLADORES DE CONTROL EN CASCADA CON SENSOR ULTRASONICO	183
9.2.1.	Control en cascada 1.....	184
9.2.1.1.	Control de lazo interno por tercer método de Z&N	184
9.2.1.2.	Control de lazo externo por método manual	188
9.2.1.3.	Control de lazo externo por método Tuning	191
9.2.2.	Control en cascada 2.....	194
9.2.2.1.	Control de lazo interno por método de Dahlin	194
9.2.2.2.	Control de lazo externo por método manual	198
9.2.2.3.	Control de lazo externo por método Tuning	201
9.2.2.3.1.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método manual	204

9.2.2.3.6.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por método DAHLIN Y lazo externo por método manual.....	228
9.2.2.3.8.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por DAHLIN y lazo externo por método Tuning	237
9.3.	ANALISIS DE RESULTADOS CON SENSOR ULTRASONICO.....	239
9.3.1.	Controladores clásicos	239
9.3.2.	Controladores clásicos control en cascada	242
9.4.	DISEÑO DE CONTROLADORES CON VISIÓN ARTIFICIAL.....	244
9.4.1.	Controlador PID por segundo método de Z&N.....	245
9.4.2.	Controlador PD por método Tuning	249
9.4.3.	Controlador PID por método Tuning	251
9.4.4.	Validación de la metodología para controladores obtenidos	255
9.4.4.1.	Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control	256
9.4.4.1.1.	Puesta del sistema control pid segundo metodo de z&n en simulación de la planta	256
9.4.4.1.2.	Puesta del sistema de control PD por Tuning en simulación de la planta	257
9.4.4.1.3.	Puesta del sistema de control PID Tuning en simulación de la planta	258
9.4.4.2.	Validación estadística de los resultados	259
9.4.4.2.1.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por segundo método Z&N	259
9.4.4.2.2.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID por segundo método Z&N	265
9.4.4.2.3.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning.....	267
9.4.4.2.4.	Estudio del régimen estable del sistema de control PD por Tuning	272
9.4.4.2.5.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por Tuning	274
9.4.4.2.6.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID por Tuning ...	282
9.5.	DISEÑO DE CONTROLADORES DE CONTROL EN CASCADA CON VISION ARTIFICIAL.....	284
9.5.1.	Control en cascada 1.....	285
9.5.1.1.	Control de lazo interno por tercer método de Z&N.....	285
9.5.1.2.	Control de lazo externo por método Tuning	289

9.5.2.	Control en cascada 2.....	291
9.5.2.1.	Control de lazo interno por método de Dahlin	291
9.5.2.2.	Control de lazo externo por método Tuning	295
9.5.3.	Validación de la metodología implementada para controladores obtenidos 296	
9.5.3.1.	Validación estadística de los resultados	296
9.5.3.1.1.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método TUNING	296
9.5.3.1.2.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método TUNING	304
9.5.3.1.3.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por método de DAHLIN y lazo externo por método tuning.....	305
9.5.3.1.4.	Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método Tuning	313
9.6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS VISIÓN ARTIFICIAL	315
9.6.1.	Controlador PID clásico	315
9.6.2.	Controlador clásico en cascada	318
10.	INGRESO DE VALOR DESEADO EN LA PLANTA REAL	320
11.	CONTROL DE LA PLANTA REAL CON SENSOR ULTRASONICO.....	321
11.1.	LINEALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL SENSOR ULTRASÓNICO	321
11.2.	CONTROL PID DE LA PLANTA REAL	322
11.3.	CONTROL PID EN CASCADA DE LA PLANTA REAL	325
11.4.	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA CONTROLADOR PID CLÁSICO Y PID EN CASCADA	328
11.4.1.	Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 2 métodos de control	330
11.4.1.1.	Puesta del sistema de control PID clásico en la planta real	330
11.4.1.2.	Puesta del sistema de control PID en cascada en la planta real	331
11.4.2.	Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico	332
11.4.2.1.	Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID 332	
11.4.2.2.	Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID.....	337
11.4.3.	Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico en cascada	345

11.4.3.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID en cascada	345
11.4.3.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID clásico en cascada	350
11.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	358
12. CONTROL DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL.....	362
12.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	362
12.2. PROCESO MATEMÁTICO PARA VISIÓN ARTIFICIAL	364
12.3. CONTROL PID DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL	365
12.4. CONTROL PID EN CASCADA DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL.....	368
12.5. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA CONTROLADOR PID CLÁSICO Y PID EN CASCADA CON VA.....	371
12.5.1. Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 2 métodos de control	373
12.5.1.1. Puesta del sistema de control PID clásico con VA en la planta real	373
12.5.1.2. Puesta del sistema de control PID en cascada con VA en la planta real	374
12.5.2. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico con VA	375
12.5.2.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID con VA	375
12.5.2.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID con VA	380
12.5.3. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico en cascada con VA	388
12.5.3.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID en cascada con VA	388
12.5.3.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID clásico en cascada	393
13. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CONTROLADORES CON SENSOR ULTRASONICO Y CÁMARA	402
CAPITULO 6	405
14. DISEÑO DE HMI.....	405
14.1. ETAPA 1	406
14.2. ETAPA 2	406

14.3.	ETAPA 3	407
14.3.1.	Fase 1: Estándares del sistema	407
14.3.2.	Fase 2: Diseño.....	408
14.3.3.	Fase 3: Implementación.....	410
14.3.4.	Fase 4: Operación	415
15.	CONCLUSIONES	416
16.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	420
17.	ANEXOS.....	425

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura final del sistema Ball and Plate	39
Figura 2 Diagrama del sistema Ball and Beam	40
Figura 3 Sensor de posición del sistema Ball and Beam	40
Figura 4 Sistema Ball & Beam	40
Figura 5 Análisis de fuerza de la pelota en OP-xyz.....	41
Figura 6 (a) Modelo del robot de seis patas paralelas; (b) mecanismo de la pierna.	42
Figura 7 Configuración de doble lazo cerrado para el control de posición del sistema bola y viga. La tarjeta PCI 6221 establece la conexión entre el ambiente de la computadora y el montaje de laboratorio	43
Figura 8 Prototipo final. SEH = Sensor de efecto Hall, SO = Sensor óptico	43
Figura 9 Diagrama esquemático del BBS	45
Figura 10 Sistema físico Ball-Beam	46
Figura 11 Dibujo esquemático y fotografía de la viga flexible accionada por una plataforma de husillo de bolas.	47
Figura 12 Diagrama esquemático del sistema viga – esfera.....	48
Figura 13 Configuración experimental del sistema de viga esfera.....	48
Figura 14 Diagrama de bloques esquemático.....	49
Figura 15 Sistema de bolas y vigas	51
Figura 16 ARDUINO MEGA 2560.....	52
Figura 17 Logo de Matlab. Fuente: The MathWorks, Inc. Logo de Matlab [imagen]. [sitio web]. 1994. Disponible en: https://www.mathworks.com/products/matlab.html	52
Figura 18 Esquema simplificado del proceso de muestreo	53
Figura 19 Interfaz HMI desarrollada en graphworx	54
Figura 20 Diagrama de bloques del sistema bajo estudio.....	55
Figura 21 Respuesta de los modelos $G_p(s)$, $G_1(s)$ y $G_2(s)$ con estrategia de control clásico: (a) – ante un paso escalón en la referencia. (b) – ante un paso escalón en el disturbio	55
Figura 22 Representación mediante Simulink del modelo AC5A de unidades de excitación-generación eléctrica controlado mediante un PID.....	56
Figura 23 Gráfica del lugar de las raíces	58
Figura 24 Línea de conversión de números a decibelios	59
Figura 25 (a) Diagrama de Bode de $G(jw) = 1/jw$; (b) diagrama de Bode de $G(jw) =$ jw	60
Figura 26 Sistema de control	61
Figura 27 Diagrama de Bode	61
Figura 28 Curva de respuesta a un escalón unitario.....	62
Figura 29 Gráfico de anillo del tipo de control. Autoría propia	67

Figura 30 Gráfico de anillo del tipo de microprocesador. Autoría propia.....	68
Figura 31 Gráfico de anillo del tipo de actuador. Autoría propia	68
Figura 32 Gráfico de anillo del tipo de sensorica. Autoría propia	69
Figura 33 Madera MDF	74
Figura 34 Lámina de Acero Inoxidable.....	76
Figura 35 Sensor ultrasonido HC-SR04	78
Figura 36 XYZROBOT SMART SERVO A1-16	80
Figura 37 Conexión pantalla Nextion NX1060P101-011R-I	82
Figura 38 Filamento PLA	83
Figura 39 ARDUINO MEGA 2560	85
Figura 40 Varilla de acero inoxidable	86
Figura 41 Material PLA	88
Figura 42 Filamento PLA para impresora 3D	89
Figura 43 Sensor ultrasonido HC-SR04	91
Figura 44 Cámara web full HD	92
Figura 45 Diseño CAD del sistema Ball and beam. Autoría propia	93
Figura 46 Medidas de separación de cada componente por la vista frontal. Autoría propia.....	93
Figura 47 Medidas de separación de cada componente por la vista lateral derecha Autoría propia	94
Figura 48 Circuito electrónico en Proteus. Autoría propia	94
Figura 49 Diseño placa PCB. Autoría propia	95
Figura 50 Circuito de modulo relé	95
Figura 51 Tabla MDF. Autoría propia.....	96
Figura 52 Medidas Tabla MDF. Autoría propia	96
Figura 53 Medidas de la base para soporte ball and beam. Autoría propia	97
Figura 54 L para soporte del carril. Autoría propia	97
Figura 55 Medidas de Soporte para carril. Autoría propia.....	98
Figura 56 Unión de las L y carril. Autoría propia	98
Figura 57 Medidas conector de las L y carril. Autoría propia	99
Figura 58 Rodachina colgante. Autoría propia.....	99
Figura 59 Bandera a medir. Autoría propia	99
Figura 60 Medidas bandera a medir. Autoría propia	100
Figura 61 Carro a medir. Autoría propia.....	100
Figura 62 Perfil de acero inoxidable. Autoría propia	101
Figura 63 Medidas perfil de acero inoxidable. Autoría propia	101
Figura 64 Lamina para movimiento. Autoría propia	102
Figura 65 Medidas lamina para movimiento. Autoría propia	102
Figura 66 Lamina para rigidez del riel. Autoría propia.....	103
Figura 67 Medidas lamina para rigidez del riel. Autoría propia	103
Figura 68 Soporte y carcasa del sensor de posición. Autoría propia	104

Figura 69 Medidas de la carga de sensor de posición. Autoría propia.....	104
Figura 70 Medidas soporte del sensor de posición. Autoría propia.....	105
Figura 71 Pieza de transmisión para movimiento. Autoría propia.....	105
Figura 72 Medidas conector parte inferior tornillo. Autoría propia.....	106
Figura 73 Medidas conector parte superior tornillo. Autoría propia.....	106
Figura 74 Ensamble de las piezas de transmisión de movimiento, el perfil y la pieza de unión de las L. Autoría propia.....	107
Figura 75 Piezas soporte actuador. Autoría propia.....	107
Figura 76 Medidas piezas en T para soporte del servomotor. Autoría propia.....	108
Figura 77 Manivela actuador. Autoría propia	108
Figura 78 Medidas manivela actuador. Autoría propia.....	109
Figura 79 Soporte Potenciómetro. Autoría propia	109
Figura 80 Medidas de soporte de potenciómetro. Autoría propia.....	110
Figura 81 Ensamble de actuador y potenciómetro. Autoría propia	110
Figura 82 ball and beam. Autoría propia	111
Figura 83 Varillas de acero inoxidable. Autoría propia.....	111
Figura 84 Medidas de varillas de acero inoxidable. Autoría propia	112
Figura 85 Base 1 para setpoint forma manual. Autoría propia	112
Figura 86 Medidas para base 1 setpoint forma manual. Autoría propia.....	112
Figura 87 Medidas para base 2 setpoint forma manual. Autoría propia.....	113
Figura 88 Forma manual del sistema ball and beam. Autoría propia	113
Figura 89 Pantalla HMI. Autoría propia	114
Figura 90 Medidas pantalla con carcasa. Autoría propia	114
Figura 91 Fondo del proyecto. Autoría propia	115
Figura 92 Montaje de los componentes físicos sin la parte eléctrica. Autoría propia	115
Figura 93 Componente de trabajo para área de visión artificial. Autoría propia...	116
Figura 94 sistema estable	131
Figura 95 Sistema inestable.....	131
Figura 96 Estabilidad de un sistema en función de la posición de los polos	132
Figura 97 Diagrama de bloques lazo abierto. Autoría propia	132
Figura 98 respuesta del sistema a lazo abierto. Autoría propia	133
Figura 99 Programa en Matlab para graficar los polos y ceros. Autoría propia....	133
Figura 100 Polos del sistema. Autoría propia	134
Figura 101 Respuesta de un sistema en función de la posición de los polos en el origen.....	134
Figura 102 Respuesta de un sistema en función de la posición de los polos en el eje imaginario negativo	135
Figura 103 Diagrama de bloques control P. Autoría propia	135
Figura 104 Lazo de control con realimentación negativa. Autoría propia.....	135
Figura 105 Polos del sistema control P. Autoría propia	136

Figura 106 Diagrama de bloques lazo cerrado control P. Autoría propia	136
Figura 107 Salida controlador Proporcional. Autoría propia.....	137
Figura 108 Diagrama de bloques controlador PD. Autoría propia.....	137
Figura 109 Respuesta controlador PD. Autoría propia.....	138
Figura 110 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia.....	138
Figura 111 Respuesta controlador PID. Autoría propia.....	139
Figura 112 Diagrama de bloques de control por segundo método de Z&N. Autoría propia.....	140
Figura 113 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control". Autoría propia .	140
Figura 114 Valor del parámetro Kcr. Autoría propia.....	141
Figura 115 Valor del parámetro Pcr obtenido mediante la respuesta. Autoría propia	141
Figura 116 valores de parámetros de sintonización PID. Autoría propia.....	142
Figura 117 Respuesta obtenida del lazo de control con una entrada escalón de 20 cm. Autoría propia.....	143
Figura 118 Señal obtenida con ajuste de parámetros PID. Autoría propia.....	144
Figura 119 Diagrama de bloques de control por método Tuning. Autoría propia.	145
Figura 120 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control1". Autoría propia	145
Figura 121 Aplicación de método Tuning. Autoría propia	145
Figura 122 Respuesta aplicando el método Tuning. Autoría propia.....	146
Figura 123 Parámetros del controlador por método Tuning. Autoría propia	146
Figura 124 Señal de salida del sistema con el controlador PD por método Tuning. Autoría propia	147
Figura 125 Diagrama de bloques de control PID por método Tuning. Autoría propia	148
Figura 126 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control2". Autoría propia	148
Figura 127 Aplicación de Tune para controlador PID. Autoría propia	148
Figura 128 Respuesta obtenida al tuneear el controlador. Autoría propia	149
Figura 129 Parámetros del controlador PID por método Tuning. Autoría propia .	149
Figura 130 Señal de salida de lazo de control con controlador PID por método Tuning. Autoría propia.....	150
Figura 131 Controlador PID con Anti-Windup. Autoría propia.....	150
Figura 132 Respuesta del sistema al aplicar Anti-Windup. Autoría propia.....	151
Figura 133 Diagrama de bloque de lazo cerrado con control PID clásico. Autoría propia.....	153
Figura 134 Diagrama de bloque para controlador PID para análisis. Autoría propia	154
Figura 135 Diagrama de bloque para controlador PID. Autoría propia	155
Figura 136 Respuesta del sistema con controlador PID por segundo método de Z&N. Autoría propia	156

Figura 137 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N. Autoría propia	156
Figura 138 Respuesta del controlador en tiempos del 10% y 90%	157
Figura 139 Tiempo de establecimiento 98%. Autoría propia.....	158
Figura 140 Respuesta del sistema controlador PID 2 METODO Z&N con ruido .	158
Figura 141 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N con ruido. Autoría propia	159
Figura 142 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	160
Figura 143 Tiempo de establecimiento 98% con ruido. Autoría propia	161
Figura 144 Diagrama de bloques de control por 2° método Z&N ante ruido. Autoría propia.....	161
Figura 145 respuesta del sistema con control por 2° método Z&N ante ruido. Autoría propia	162
Figura 146 Diagrama de bloques del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia.....	162
Figura 147 respuesta del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia	163
Figura 148 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia	164
Figura 149 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia.....	164
Figura 150 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	165
Figura 151 Tiempo de establecimiento. autoría propia	166
Figura 152 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia	166
Figura 153 tiempo al 50% del valor final. Autoría propia.....	167
Figura 154 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	167
Figura 155 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia.....	168
Figura 156 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia	169
Figura 157 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia.....	169
Figura 158 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	170
Figura 159 Tiempo de establecimiento. autoría propia	171
Figura 160 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido	171
Figura 161 Valor del tiempo de retardo con controlador PD. Autoría propia.....	172
Figura 162 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	172
Figura 163 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia.....	173
Figura 164 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido.....	174
Figura 165 Respuesta estable controlador método tuning. autoría propia.....	174

Figura 166 diagrama de bloques control PD método tuning perturbación. Autoría propia.....	175
Figura 167 Respuesta etapa estable control PD método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia.....	175
Figura 168 Diagrama de bloques controlador PID método de tuning. Autoría propia	176
Figura 169 Controlador PID METODO TUNING. Autoría propia	176
Figura 170 50% del punto de estabilización PID por METODO TUNING. Autoría propia.....	177
Figura 171 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	177
Figura 172 Tiempo de establecimiento. autoría propia	178
Figura 173 Diagrama de bloques control PID sometido a ruido. Autoría propia...	178
Figura 174 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia	179
Figura 175 Tiempo de retardo controlador PD por tuning. Autoría propia.....	179
Figura 176 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	180
Figura 177 Controlador PID método tuning con ruido al 98%. Autoría propia.....	181
Figura 178 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido.....	181
Figura 179 Respuesta transitoria controlador método tuning con ruido. Autoría propia.....	182
Figura 180 diagrama de bloques control PID método tuning perturbación. Autoría propia.....	182
Figura 181 Respuesta etapa estable control PID método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia.....	183
Figura 182 Lazo abierto con dos entradas escalón para obtención de controlador interno. Autoría propia.....	184
Figura 183 Respuesta del sistema a doble escalón. Autoría propia	184
Figura 184 Análisis del segundo escalón. Autoría propia	185
Figura 185 Lazo de control para controlador interno. Autoría propia	187
Figura 186 Respuesta del sistema del lazo de control interno. Autoría propia.....	187
Figura 187 Respuesta del sistema mejorada.....	188
Figura 188 Lazo de control en cascada con controlador externo manual. Autoría propia.....	188
Figura 189 Grafica con parámetro Kp. Autoría propia.....	189
Figura 190 grafica controlador PID. Autoría propia.....	190
Figura 191 Error lazo interno. Autoría propia	190
Figura 192 Error lazo externo. Autoría propia	191
Figura 193 Grafica del error lazo interno. Autoría propia	191
Figura 194 Controlador lazo externo método tuning. Autoría propia.....	192

Figura 195 Respuesta controlador lazo externo por método tuning. Autoría propia	192
Figura 196 Respuesta controlador en cascada. Autoría propia	193
Figura 197 Respuesta controlador ajustado. Autoría propia	193
Figura 198 Error del controlador del lazo interno. Autoría propia.....	194
Figura 199 Error lazo externo controlador. Autoría propia	194
Figura 200 Método DAHLIN lazo de control interno. Autoría propia	195
Figura 201 Respuesta del sistema sometido a dos escalones. Autoría propia	195
Figura 202 Tiempos de 28 y 63 %. Autoría propia.....	196
Figura 203 Constantes controlador método DAHLIN	196
Figura 204 control lazo interno método DAHLIN. Autoría propia	197
Figura 205 Respuesta controlador lazo interno. Autoría propia	198
Figura 206 Diagrama de bloques control lazo externo método manual. Autoría propia.....	198
Figura 207 grafica con Kp. Autoría propia.....	199
Figura 208 Grafica con Kp y Kd. Autoría propia.....	200
Figura 209 Grafica con Kp, Ki y Kd. Autoría propia.....	200
Figura 210 Error interno. Autoría propia.....	201
Figura 211 Error lazo externo. Autoría propia	201
Figura 212 Control lazo externo método tuning. Autoría propia	202
Figura 213 Respuesta del controlador por método de tuning. autoría propia.....	202
Figura 214 Respuesta del controlador en cascada con lazo externo PID por tuning. Autoría propia	203
Figura 215 Respuesta controlador con ajuste manual de los parámetros. Autoría propia.....	203
Figura 216 Error lazo interno. Autoría propia	204
Figura 217 error lazo externo. Autoría propia	204
Figura 218 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia.....	205
Figura 219 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	205
Figura 220 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	206
Figura 221 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	206
Figura 222 Tiempo de establecimiento. autoría propia	207
Figura 223 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	207
Figura 224 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	208
Figura 225 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	208
Figura 226 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	209
Figura 227 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	210
Figura 228 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido.....	210

Figura 229 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	211
Figura 230 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	211
Figura 231 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	212
Figura 232 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia.....	212
Figura 233 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	213
Figura 234 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	213
Figura 235 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	214
Figura 236 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia	214
Figura 237 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	215
Figura 238 Tiempo de establecimiento. autoría propia	215
Figura 239 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	216
Figura 240 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	216
Figura 241 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	217
Figura 242 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	217
Figura 243 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia.....	218
Figura 244 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	218
Figura 245 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	219
Figura 246 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia	219
Figura 247 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	220
Figura 248 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	220
Figura 249 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	221
Figura 250 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia.....	221
Figura 251 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	222
Figura 252 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	222
Figura 253 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	223
Figura 254 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	223
Figura 255 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	224
Figura 256 Tiempo de establecimiento. autoría propia	224
Figura 257 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	225
Figura 258 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	225

Figura 259 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	226
Figura 260 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	226
Figura 261 Tiempo pico Control cascada. Autoría propia	227
Figura 262 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	227
Figura 263 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	228
Figura 264 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido.....	228
Figura 265 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	229
Figura 266 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	229
Figura 267 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	230
Figura 268 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia.....	230
Figura 269 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	231
Figura 270 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	231
Figura 271 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	232
Figura 272 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia	232
Figura 273 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	233
Figura 274 Tiempo de establecimiento. autoría propia	233
Figura 275 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	234
Figura 276 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	234
Figura 277 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	235
Figura 278 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	235
Figura 279 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia.....	236
Figura 280 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	236
Figura 281 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	237
Figura 282 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia	237
Figura 283 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	238
Figura 284 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	238
Figura 285 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	239
Figura 286 Diagrama de bloques controladores clásicos. Autoría propia	240
Figura 287 respuesta controladores clásicos. Autoría propia.....	240
Figura 288 Diagrama de bloques controladores clásicos con ruido. Autoría propia	241

Figura 289 respuesta controladores clásicos con ruido. Autoría propia.....	241
Figura 290 Respuesta controladores en cascada condiciones normales. Autoría propia.....	243
Figura 291 Diagrama de bloques Comparación controladores. Autoría propia....	243
Figura 292 Comparación de controladores. Autoría propia.....	244
Figura 293 Diagrama de bloques lazo abierto. Autoría propia	244
Figura 294 Respuesta planta a alza abierto.....	245
Figura 295 Diagrama de bloques Control 2 METODO Z&N. Autoría propia	245
Figura 296 Valor del parámetro Kcr. Autoría propia.....	246
Figura 297 Valor del parámetro Pcr obtenido mediante la respuesta. Autoría propia	246
Figura 298 valores de parámetros de sintonización PID. Autoría propia.....	247
Figura 299 Respuesta obtenida del lazo de control con una entrada escalón de 20 cm. Autoría propia.....	248
Figura 300 Señal obtenida con ajuste de parámetros PID. Autoría propia.....	249
Figura 301 Diagrama de bloques de control por método Tuning. Autoría propia.	250
Figura 302 Aplicación de método Tuning. Autoría propia	250
Figura 303 Respuesta aplicando el método Tuning. Autoría propia.....	250
Figura 304 Parámetros del controlador por método Tuning. Autoría propia.....	251
Figura 305 Señal de salida del sistema con el controlador PD por método Tuning. Autoría propia	251
Figura 306 Diagrama de bloques de control PID por método Tuning. Autoría propia	252
Figura 307 Aplicación de Tune para controlador PID. Autoría propia	252
Figura 308 Respuesta obtenida al tuneear el controlador. Autoría propia	253
Figura 309 Parámetros del controlador PID por método Tuning. Autoría propia .	253
Figura 310 Señal de salida de lazo de control con controlador PID por método Tuning. Autoría propia.....	254
Figura 311 Controlador PID con Anti-Windup. Autoría propia.....	254
Figura 312 Respuesta del sistema al aplicar Anti-Windup. Autoría propia.....	255
Figura 313 Control por Segundo Método Z&N. Autoría propia	257
Figura 314 Control PD TUNING. Autoría propia	258
Figura 315 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia.....	259
Figura 316 Respuesta del sistema con controlador PID por segundo método de Z&N. Autoría propia	260
Figura 317 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N. Autoría propia	260
Figura 318 4.....	261
Figura 319 Tiempo de establecimiento 98%. Autoría propia.....	262
Figura 320 Respuesta del sistema controlador PID 2 METODO Z&N con ruido .	262

Figura 321 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N con ruido. Autoría propia	263
Figura 322 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	264
Figura 323 Tiempo de establecimiento 98% con ruido. Autoría propia	265
Figura 324 Diagrama de bloques de control por 2° método Z&N ante ruido. Autoría propia.....	265
Figura 325 respuesta del sistema con control por 2° método Z&N ante ruido. Autoría propia	266
Figura 326 Diagrama de bloques del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia.....	266
Figura 327 respuesta del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia	267
Figura 328 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia	268
Figura 329 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia.....	268
Figura 330 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	269
Figura 331 Tiempo de establecimiento. autoría propia	270
Figura 332 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia	270
Figura 333 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	271
Figura 334 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia.....	272
Figura 335 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido.....	273
Figura 336 Respuesta estable controlador método tuning. autoría propia	273
Figura 337 diagrama de bloques control PD método tuning perturbación. Autoría propia.....	274
Figura 338 Respuesta etapa estable control PD método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia.....	274
Figura 339 Diagrama de bloques controlador PID método de tuning. Autoría propia	275
Figura 340 Controlador PID METODO TUNING. Autoría propia	275
Figura 341 50% del punto de estabilización PID por METODO TUNING. Autoría propia.....	276
Figura 342 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	276
Figura 343 Tiempo pico máximo Control PID. Autoría propia	277
Figura 344 sobre impulso máximo Control PID. Autoría propia	277
Figura 345 Tiempo de establecimiento. autoría propia	278
Figura 346 Diagrama de bloques control PID sometido a ruido. Autoría propia...278	
Figura 347 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia	279

Figura 348 Control método tuning ante perturbación. Autoría propia.....	279
Figura 349 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	280
Figura 350 Tiempo pico máximo Control PID. Autoría propia	280
Figura 351 Pico máximo Control PID. Autoría propia.....	281
Figura 352 Controlador PID método tuning con ruido al 98%. Autoría propia.....	282
Figura 353 Diagrama de bloques control PID por tuning con ruido.....	282
Figura 354 Respuesta transitoria controlador método tuning con ruido. autoría propia.....	283
Figura 355 diagrama de bloques control PID método tuning perturbación. Autoría propia.....	283
Figura 356 Respuesta etapa estable control PID método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia.....	284
Figura 357 Diagrama de bloques lazo interno. Autoría propia	285
Figura 358 Respuesta a os escalones para identificación. Autoría propia	285
Figura 359 respuesta segundo escalón. Autoría propia.....	286
Figura 360 Controlador lazo interno por tercer método de Z&N. Autoría propia ..	288
Figura 361 Respuesta controlador. Autoría propia.....	288
Figura 362 Respuesta salida controlador ajustado. Autoría propia.....	289
Figura 363 Diagrama de bloques control Cascada. Autoría propia.....	289
Figura 364 Parámetros del controlador lazo externo método TUNING. Autoría propia.....	290
Figura 365 Respuesta controlador PID ajustado. Autoría propia	291
Figura 366 Identificación control lazo interno por método de Dahlin. Autoría propia	291
Figura 367 Sistema sometido a Dos setpoint. Autoría propia	292
Figura 368 segundo escalón método Dahlin. Autoría propia.....	292
Figura 369 Controlador lazo interno método de DAHLIN. Autoría propia.....	294
Figura 370 Respuesta controlador lazo interno método de DAHLIN. Autoría propia	294
Figura 371 Diagrama de bloques control Cascada. Autoría propia.....	295
Figura 372 Parámetros del controlador lazo externo método TUNING. Autoría propia.....	295
Figura 373 Respuesta controlador PID ajustado. Autoría propia	296
Figura 374 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia.....	297
Figura 375 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	297
Figura 376 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	298
Figura 377 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	298
Figura 378 Tiempo para el primer pico máximo del sistema. Autoría propia.....	299
Figura 379 Mayor pico presentado en la salida del sistema. Autoría propia	299

Figura 380 Tiempo de establecimiento. autoría propia	300
Figura 381 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	300
Figura 382 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	301
Figura 383 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	301
Figura 384 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	302
Figura 385 Tiempo para el primer pico máximo del sistema. Autoría propia.....	302
Figura 386 Mayor pico presentado en la salida del sistema. Autoría propia	303
Figura 387 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	303
Figura 388 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia	304
Figura 389 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	304
Figura 390 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	305
Figura 391 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	305
Figura 392 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia.....	306
Figura 393 Controlador PID Control cascada. Autoría propia	306
Figura 394 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia	307
Figura 395 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia.....	307
Figura 396 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia	308
Figura 397 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	308
Figura 398 Tiempo de establecimiento. autoría propia	309
Figura 399 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia.....	309
Figura 400 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia...	310
Figura 401 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia	310
Figura 402 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia	311
Figura 403 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia.....	311
Figura 404 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia	312
Figura 405 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia	312
Figura 406 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia	313
Figura 407 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia	313
Figura 408 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia.....	314
Figura 409 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia.....	314

Figura 410 Diagrama de bloques controladores clásicos. Autoría propia	316
Figura 411 respuesta controladores clásicos. Autoría propia.....	316
Figura 412 Diagrama de bloques controladores clásicos con ruido. Autoría propia	317
Figura 413 respuesta controladores clásicos con ruido. Autoría propia.....	317
Figura 414 Respuesta controladores en cascada condiciones normales. Autoría propia.....	318
Figura 415 Controladores Cascada sometidos a ruido. Autoría propia.....	319
Figura 416 Respuesta controladores en cascada. Autoría propia.....	319
Figura 417 Valor deseado de forma digital	320
Figura 418 Valor deseado de forma manual	320
Figura 419 Código de Filtro promedio. Autoría propia	321
Figura 420 Trozo de código método "lookuptable". Autoría propia	322
Figura 421 Diagrama de flujo de código de controlador PID con medición de sensor ultrasónico. Autoría propia	323
Figura 422 Respuesta del sistema con controlador PID. Autoría propia.....	324
Figura 423 Posición angular de la manivela. Autoría propia	325
Figura 424 Diagrama de flujo de código de controlador PID en cascada. Autoría propia.....	326
Figura 425 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada. Autoría propia	328
Figura 426 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en condiciones normales. Autoría propia.....	333
Figura 427 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID. Autoría propia	334
Figura 428 Respuesta del sistema con controlador PID con ruido. Autoría propia	335
Figura 429 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido. Autoría propia	336
Figura 430 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con ruido. Autoría propia	337
Figura 431 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID. Autoría propia	339
Figura 432 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia	340
Figura 433 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia.....	340
Figura 434 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia.....	342
Figura 435 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia	343

Figura 436 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia.....	343
Figura 437 Respuesta del controlador PID clásico ante perturbación. Autoría propia.....	345
Figura 438 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en cascada en condiciones normales. Autoría propia.....	346
Figura 439 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada. Autoría propia	347
Figura 440 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada con ruido. Autoría propia	348
Figura 441 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido. Autoría propia	349
Figura 442 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con ruido. Autoría propia	350
Figura 443 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID en cascada. Autoría propia	352
Figura 444 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada. Autoría propia.....	353
Figura 445 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada. Autoría propia	353
Figura 446 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia	355
Figura 447 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia.....	356
Figura 448 error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia.....	356
Figura 449 Respuesta del controlador PID clásico en cascada ante perturbación. Autoría propia	358
Figura 450 Parámetros de ajuste para la imagen. Autoría propia.....	362
Figura 451 Región de interés de la imagen. Autoría propia	362
Figura 452 Rotación de la imagen a - 3 grados. Autoría propia	363
Figura 453 Recorte de la imagen. Autoría propia.....	363
Figura 454 Filtro RGB para imagen. Autoría propia	363
Figura 455 Imagen con relleno. Autoría propia	364
Figura 456 Imagen sin pixeles menor a 30 y con centroide. Autoría propia.....	364
Figura 457 Matriz de datos de 2 filas y 44 columnas. Autoría propia.....	364
Figura 458 Calculo para conversión a cm. Autoría propia	364
Figura 459 Diagrama de flujo de código de controlador PID con medición por visión artificial. Autoría propia	366
Figura 460 Respuesta del sistema con controlador PID Y VA. Autoría propia.....	367

Figura 461 Posición angular de la manivela con PID en cascada . Autoría propia	368
Figura 462 Diagrama de flujo de código de controlador PID en cascada con VA. Autoría propia	369
Figura 463 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada y VA. Autoría propia.....	371
Figura 464 Respuesta del sistema con controlador PID clásico y VA en condiciones normales. Autoría propia.....	376
Figura 465 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con VA. Autoría propia.....	377
Figura 466 Respuesta del sistema con controlador PID y VA ante ruido. Autoría propia.....	378
Figura 467 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID y VA con ruido. Autoría propia	379
Figura 468 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID y VA con ruido. Autoría propia	380
Figura 469 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID y VA. Autoría propia.....	382
Figura 470 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico con VA. Autoría propia.....	383
Figura 471 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia.....	383
Figura 472 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia	385
Figura 473 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia.....	386
Figura 474 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia	386
Figura 475 Respuesta del controlador PID clásico con VA ante perturbación. Autoría propia	388
Figura 476 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en cascada y VA en condiciones normales. Autoría propia.....	389
Figura 477 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con VA. Autoría propia.....	390
Figura 478 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada y VA ante ruido. Autoría propia	391
Figura 479 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID y VA ante ruido. Autoría propia	392
Figura 480 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con ruido. Autoría propia	393

Figura 481 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID en cascada y VA en condiciones normales. Autoría propia	395
Figura 482 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada con VA. Autoría propia	396
Figura 483 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA. Autoría propia.....	396
Figura 484 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia	398
Figura 485 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia.....	399
Figura 486 error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia	399
Figura 487 Respuesta del controlador PID clásico en cascada con VA ante perturbación. Autoría propia.....	401
Figura 488 Ciclo de vida de la HMI	405
Figura 489 Diagrama P&ID de la planta. Autoría propia	407
Figura 490 Bosquejo de la HMI (Tipo de medición). Autoría propia.....	409
Figura 491 Bosquejo de HMI de la planta. Autoría propia.....	410
Figura 492 Pestaña para ingreso. Autoría propia.....	411
Figura 493 Pestaña para cambio de contraseña. Autoría propia	411
Figura 494 Pestaña tipo de ingreso usuario. Autoría propia	412
Figura 495 Pestaña para selección tipo de medición. Autoría propia	412
Figura 496 Pestaña de interfaz de la planta. Autoría propia	413
Figura 497 Pestaña tipo de ingreso mantenimiento. Autoría propia.....	413
Figura 498 Pestaña visualización general de la instrumentación de la planta. Autoría propia	414
Figura 499 Pestaña visualización detallada de la instrumentación de la planta. Autoría propia	414
Figura 500 Parámetros para comunicación de la pantalla con el microcontrolador. Autoría propia	415

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Análisis del estado de arte. Autoría propia.....	62
Tabla 2 Datos de los diferentes tipos de control. Autoría propia.....	67
Tabla 3 Datos de los diferentes tipos de microprocesadores. Autoría propia	67
Tabla 4 Datos de los diferentes tipos de actuadores. Autoría propia.....	68
Tabla 5 Datos de los diferentes tipos de sensores. Autoría propia	69
Tabla 6 Matriz de selección para el material de las bases. Autoría Propia	73
Tabla 7 Propiedades físico-mecánicas	75
Tabla 8 Matriz de selección para el carril y su soporte. Autoría Propia.....	76
Tabla 9 Matriz de selección para el sensor de posición. Autoría propia.....	77
Tabla 10 Matriz de selección para el servomotor. Autoría propia	79
Tabla 11 Matriz de selección de la pantalla HMI. Autoría propia	81
Tabla 12 Matriz de selección del material para soporte del actuador. Autoría propia	83
Tabla 13 Matriz de selección para microcontrolador. Autoría propia	84
Tabla 14 Matriz de selección para la varilla. Autoría propia.....	86
Tabla 15 Matriz de selección del material de las bases del sistema Ball and beam forma manual	87
Tabla 16 Matriz de selección del soporte y carcasas de sensores	89
Tabla 17 Matriz de selección para el sensor de posición. Autoría propia.....	90
Tabla 18 Matriz de selección de la cámara. Autoría propia	92
Tabla 19 puntos críticos para la distribución T de Student.....	122
Tabla 20 Tipo de controladores mediante el segundo método de Z&N.....	142
Tabla 21 Ajuste de Parámetros PID. Autoría propia	143
Tabla 22 tabla de controlador por Z&N	186
Tabla 23 Ajuste para mejorar el controlador por ensayo y error. Autoría propia	187
Tabla 24 Ajuste de controlador manual externo. Autoría propia	189
Tabla 25 Ajuste parámetros controlador tuning. Autoría propia	193
Tabla 26 Ajuste parámetros del controlador. Autoría propia	199
Tabla 27 Tabla ensayo y error método tuning. Autoría propia	203
Tabla 28 valores controladores clásicos. Autoría propia.....	239
Tabla 29 valores controladores clásicos en Cascada. Autoría propia.....	242
Tabla 30 Tipo de controladores mediante el segundo método de Z&N.....	247
Tabla 31 Ajuste de Parámetros PID. Autoría propia	248
Tabla 32 Parámetros para las constantes del controlar. Autoría propia.....	287
Tabla 33 Ajustes parámetros del controlador. Autoría propia	288
Tabla 34 Ajuste ensayo - error controlador externo. Autoría propia.....	290
Tabla 35 Método PID por Dahlin.....	293
Tabla 36 Ajuste ensayo - error controlador externo. Autoría propia.....	296
Tabla 37 valores controladores clásicos. Autoría propia.....	315

Tabla 38 valores controladores clásicos en Cascada. Autoría propia.....	318
Tabla 39 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico con medición por sensor ultrasónico. Autoría propia	324
Tabla 40 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico en cascada con medición por sensor ultrasónico. Autoría propia	327
Tabla 41 Parámetros del control PID en cascada. Autoría propia.....	327
Tabla 42 Plantilla de la ficha técnica muestral con sensor ultrasónico.....	329
Tabla 43 Ficha técnica muestral experimento control PID en condiciones normales	337
Tabla 44 Ficha técnica control PID ante ruido	341
Tabla 45 Ficha técnica control PID ante perturbación.....	344
Tabla 46 Ficha técnica muestral experimento control PID en cascada en condiciones normales	350
Tabla 47 Ficha técnica control PID en cascada ante ruido	354
Tabla 48 Ficha técnica control PID en cascada ante perturbación	357
Tabla 49 Resultados generales de los experimentos. Autoría propia	359
Tabla 50 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia. Autoría propia.....	360
Tabla 51 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control . Autoría propia	361
Tabla 52 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico con medición por visión artificial. Autoría propia	367
Tabla 53 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico en cascada con medición por visión artificial. Autoría propia.....	370
Tabla 54 Parámetros del control PID en cascada con VA. Autoría propia	370
Tabla 55 Plantilla de la ficha técnica muestral con medición VA.....	372
Tabla 56 Ficha técnica muestral experimento control PID con VA en condiciones normales	380
Tabla 57 Ficha técnica control PID con VA ante ruido	384
Tabla 58 Ficha técnica control PID con VA ante perturbación	387
Tabla 59 Ficha técnica muestral experimento control PID en cascada con VA en condiciones normales	394
Tabla 60 Ficha técnica control PID en cascada con VA ante ruido.....	397
Tabla 61 Ficha técnica control PID en cascada con VA ante perturbación	400
Tabla 62 Resultados generales de los experimentos con los dos tipos de medición. Autoría propia	402
Tabla 63 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia con los dos tipos de medición. Autoría propia	403
Tabla 64 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control con los dos tipos de medición. Autoría propia.....	404

GLOSARIO

AMPLIFICADOR DE POTENCIA: es un amplificador electrónico diseñado para aumentar la magnitud de potencia de una señal de entrada dada. La potencia de la señal de entrada se incrementa a un nivel lo suficientemente alto como para manejar cargas de dispositivos de salida como parlantes, auriculares, transmisores de RF, etc.

CONTROLADOR PID: es un mecanismo de control simultaneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

DIAGRAMA BODE: es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la magnitud de dicha función y otra que corresponde con la fase.

FILTRO ELECTRÓNICO: es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

FRECUENCIA: es el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier evento periódico.

FUERZA CENTRÍFUGA: es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación, o equivalentemente la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en un sistema de referencia rotatorio.

INERCIA: incapacidad que tienen los cuerpos de modificar por sí mismos el estado de reposo o movimiento en que se encuentran.

LINEALIZACIÓN: es expresar una función o ecuación diferencial no lineal con una versión lineal aproximada, sólo válida en un intervalo muy pequeño de valores de la variable independiente. Algo así como expresar una función cuadrática mediante la fórmula matemática de una línea recta.

MICROCONTROLADOR: es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales que cumplen una tarea específica.

MODELADO: Se puede definir el modelado de un determinado proceso como la obtención de un conjunto de funciones matemáticas que permiten representar, al menos de forma aproximada, el comportamiento de las variables de mayor interés del sistema bajo estudio.

MOTOR DC: es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético.

POTENCIÓMETRO DE PRECISIÓN: es un Potenciómetro con montaje de casquillo, con cuerpo completamente sellado y pines para PCB. Está diseñado para utilizarse en aplicaciones más especializadas, que requieran una variación de la resistencia de forma más detallada o con mayor sensibilidad.

RESPUESTA ESTACIONARIA: se refiere a la manera en la cual se comporta la salida del sistema conforme el tiempo tiende a infinito.

RESPUESTA TRANSITORIA: la respuesta transitoria se refiere a la que va del estado inicial al estado final.

SEGUNDA LEY DE NEWTON: esta ley se encarga de cuantificar el concepto de fuerza. La aceleración que adquiere un cuerpo es proporcional a la fuerza neta aplicada sobre el mismo.

SISTEMA BARRA-ESFERA: es un caso de estudio típico en la ingeniería de control, puesto que introduce el tema de sistemas no lineales e inestables.

SISTEMA DE MEDICIÓN: es la colección de operaciones, procedimientos, instrumentos de medición y otro equipo, software y personal definido para signar un número a la característica que está siendo medida.

SISTEMA DINÁMICO: es un sistema cuyo estado evoluciona con el tiempo, es decir, que describe todo el recorrido en la evolución del tiempo de todos los puntos de un espacio determinado.

SISTEMA NO LINEAL: representan sistemas cuyo comportamiento no es expresable como la suma de los comportamientos de sus descriptores. Más formalmente, un sistema físico, matemático o de otro tipo es no lineal cuando las ecuaciones de movimiento, evolución o comportamiento que regulan su comportamiento son no lineales. En particular, el comportamiento de sistemas no lineales no está sujeto al principio de superposición, como lo es un sistema lineal.

VELOCIDAD: es una magnitud física que expresa la relación entre el espacio recorrido por un objeto, el tiempo empleado para ello y su dirección.

RESUMEN

El sistema ball and beam es un sistema en donde la posición de una esfera sobre una barra es controlada por la inclinación de esta, en el cual, se puede aplicar los conceptos de control como el tiempo de asentamiento, sobre-impulso, tiempo de respuesta y error de estado estacionario. (En este trabajo la esfera será referenciada por un carro, el cual será el objeto a medir en la barra)

Para el desarrollo del multilazo de control que se va a utilizar se cuenta con dos lazos, un lazo interno que sirve para controlar el ángulo de inclinación de la manivela del actuador respecto a la barra y un lazo externo en el que se va a controlar la posición del carro, además para el giro de este, debido a la gravedad va a estar confinado por un canal formado por dos rieles que, sirven para el desplazamiento del objeto a medir.

El objetivo de este proyecto es equilibrar el carro en la barra en un punto determinado desde cualquier posición inicial con un error en estado estacionario que tienda a cero, lo cual se podrá observar mediante una interfaz Humano-Maquina (HMI), la cual permitirá la interacción directa entre el operario y el proceso.

Palabras claves: Control clásico, sistema ball and beam, linealización, microcontrolador, sistema dinámico, identificación de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema ball and beam es un caso de estudio típico en la ingeniería de control, puesto que introduce el tema de sistemas no lineales e inestables, esto se debe a que en lazo abierto la salida del sistema, es decir, la posición de la bola (carro en nuestro caso) en la viga aumenta indefinidamente hasta encontrar un final de la viga, cuando el ángulo de la viga permanece constante en cualquier valor distinto de cero, lo cual se puede asociar con una señal de entrada al sistema de tipo escalón.

Este trabajo de investigación llamado "CONTROL DE POSICION MULTILAZO EN UN SISTEMA DE BALANCE BALL AND BEAM", busca plantear bases de estudio, las cuales den garantías al momento de realizar prácticas de cada una de las formas de control clásico y moderno. con esto poder tener retroalimentación y afianzamiento de cada uno de estos temas, logrando nuevos conocimientos en base a hechos prácticos y visuales.

Este trabajo se desarrolló inicialmente con la investigación de los precedentes que se tenían, evaluando cada uno de los criterios de diseño, estableciendo requerimientos, los cuales son filtrados y optando por los mejores, seguidamente se debió desarrollar lo referente a la ingeniería conceptual y de detalle ejecutando los diferentes modelados para la debida implementación. para el sistema de control se implementó un lazo interno el cual es el encargado de controlar el ángulo de inclinación de la manivela respecto a la barra y un lazo externo que va a controlar la posición del carro, todos los parámetros serán visualizados mediante una interfaz humano maquina (HMI).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente se presentan muchos problemas de control, los cuales en cierta medida son fáciles de solucionar. Sin embargo, hay un importante grupo de sistemas que son, por diseño o por naturaleza, inestables, siendo el método de control clásico realimentado esencial para hacerlos operar de forma segura, por esta razón surge la necesidad de métodos de aprendizaje prácticos, como se afirma en la investigación de Watkins y Regmi¹ “el aprendizaje como aplicación es la segunda concepción más importante (22.8%), la cual es entendida como la capacidad para resolver problemas de la vida real (problemas prácticos)”.

Además, la enseñanza de ingeniería posee pocos sistemas físicos que permiten la retroalimentación visual, para que de esta forma el operario evidencie la correcta implementación del lazo de control, debido a que estos sistemas suelen ser difíciles de implementar por sus características y también porque los equipos comerciales existentes son costosos.

En base a esto se puede afirmar que se tiene una carencia de elementos físicos, los cuales integren el aprendizaje teórico-practico como fundamento para la adquisición de conocimiento, por tal motivo se plantea la siguiente pregunta:

¿La construcción de un prototipado de planta (ball and beam) brindará el apoyo al estudiante o profesional como medio para el afianzamiento de conocimiento y para la adquisición de experiencia en base a ensayo y error?

2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Con el desarrollo de sistemas cada vez más eficientes y complejos, el enfoque de la educación ha tratado de expandirse buscando la incursión de nuevas formas de hacer llegar el conocimiento a las personas, una de ellas es la implementación de modelos físicos que permitan simular los comportamientos y situaciones que se pueden presentar en un entorno industrial.

Teniendo en cuenta las diversas necesidades que se tiene al momento de desarrollar una retroalimentación de los diferentes componentes teóricos, se ve reflejada la necesidad de implementar un sistema el cual ayude o facilite el afianzamiento de conceptos y para ello se da una alternativa como lo es la

¹GONZALEZ CABANACH, Ramon. Concepciones y enfoques de aprendizaje. Vitoria-Gazteis: Revista de Psicodidáctica, 1997. p.8.

implementación de un modelo práctico Ball and Beam, el cual es una excelente herramienta para demostrar las ideas del control clásico ya que su dinámica, es muy cercana a la dinámica real encontrada en sistemas aero-espaciales, ejemplo de esto se tiene “la planificación de movimiento de bola en placa para robots de seis patas paralelas para caminar en terrenos irregulares utilizando información háptica pura”².

²CHEN, Zhijun; GAO, Feng; SUN, Qiao y TIAN, Yuan. Planificación de movimiento de bola en placa para robots de seis patas paralelas para caminar en terrenos irregulares utilizando información háptica pura. China: Shanghai Jiao Tong University, 2019; p.136.

3. DELIMITACIÓN

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un control de posición multilazo en un sistema de balance Ball and Beam.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar el estado de arte de los sistemas “Ball and Beam”, teniendo en cuenta las diversas estructuras físicas y las estrategias de control implementadas para este tipo de sistemas.
2. Realizar la ingeniería conceptual y de detalle para el sistema “Ball and Beam”
3. Construir el sistema “Ball and Beam” de acuerdo con las especificaciones establecidas.
4. Realizar el modelado matemático del sistema “Ball and Beam”
5. Diseñar el control de posición multilazo del sistema “Ball and Beam”
6. Validar el funcionamiento del sistema de control de balance, en base a la posición del carro, con el apoyo de una interfaz Humano-Maquina (HMI).

CAPITULO 1

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. ANTECEDENTES

4.1.1. Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi ³

El experimento de balanceo de bola en placa es uno de los sistemas de control más comunes y simples ya que puede utilizarse para aplicar los conceptos de control, como el tiempo de asentamiento, sobre impulso, tiempo de subida y error de estado estacionario. Además, demuestra el sistema de bucle cerrado de retroalimentación y cómo la entrada afecta el comportamiento de la salida. Además, muestra el efecto de las no linealidades, discrepancias con el modelo teórico y cómo podemos tratar estas no linealidades mediante la introducción de parámetros adicionales como el factor de integración que fuerza al error de estado estacionario a cero.

El objetivo de este experimento es responder y equilibrar la bola en la placa en un punto determinado desde cualquier posición inicial y velocidad con un error de estado estacionario cero. Para modelar este sistema, la detección de la posición de la pelota se realiza mediante una cámara. El plato se puede orientar a través de dos brazos articulados gobernados cada uno por un servomotor. Como controlador se ha utilizado la placa basada en microcontrolador Raspberry Pi. Finalmente, se ha aplicado un control PID para estabilizar la posición de la pelota en el centro del plato.

³ ARAUJO, Anabel. Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2018. 116p.



Figura 1 Estructura final del sistema Ball and Plate

Fuente: ARAUJO, Anabel. Estructura final del sistema Ball and Plate [fotografía]. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera ingeniería industrial). Sevilla: Universidad de Sevilla, 2018. p.93.

4.1.2. El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de robótica ⁴

En este trabajo se presenta el desarrollo, construcción y control de un sistema mecánico de bajo costo Ball and Beam a fin de probar algoritmos de control. El prototipo es funcional y permitió el desarrollo y aplicación de un par de controles. El diseño presentado es novedoso y no se parece a ningún prototipo comercial conocido.

El sistema barra-esfera (ball & beam) objeto de este trabajo, es un sistema en donde la posición de una esfera sobre una barra es controlada por la inclinación de la barra. El sistema tiene dos grados de libertad: la inclinación de la barra (θ) y la posición inicial de la esfera (r); y un control que actúa exclusivamente sobre la inclinación de la barra e indirectamente la posición de la esfera, por lo que se considera subactuado o superarticulado. El objetivo es controlar la posición de la esfera sobre la barra (r). El giro de la esfera, debido a la gravedad, está confinado a un canal situado en la parte superior de la barra que además cumple con la función de ser el elemento que mide la posición de la esfera. El sistema barra-esfera se puede ver como la abstracción que duplica el trabajo diario de un mesero con una charola o

⁴ BLAS, Ángel; FUENTES, Oscar; GARCÍA, Javier y SOLIS, Ulises. El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robótica. Ciudad de México: Cinvestav, 2015. p.206-213.

ciertos juegos en donde en una pequeña superficie, con n depresiones, se trata de posicionar n balines en las depresiones.

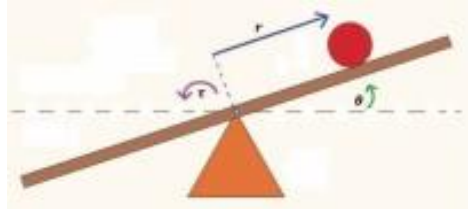


Figura 2 Diagrama del sistema Ball and Beam

Fuente: BLAS, Ángel; FUENTES, Oscar; GARCÍA, Javier y SOLIS, Ulises. Diagrama del sistema Ball and Beam [imagen]. En: Congreso Internacional de Robótica y Computación. Ciudad de México: Cinvestav, 2015. p.206.

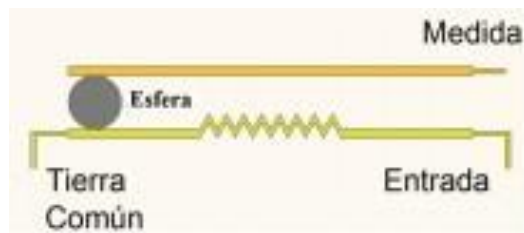


Figura 3 Sensor de posición del sistema Ball and Beam

Fuente: BLAS, Ángel; FUENTES, Oscar; GARCÍA, Javier y SOLIS, Ulises. Sensor de posición del sistema Ball and Beam [imagen]. En: Congreso Internacional de Robótica y Computación. Ciudad de México: Cinvestav, 2015. p.210.

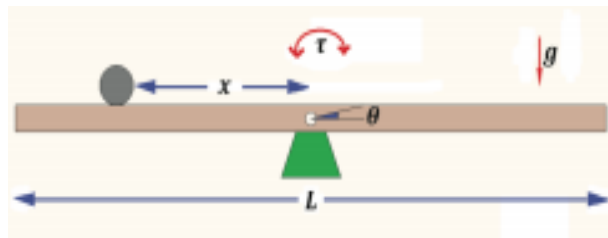


Figura 4 Sistema Ball & Beam

Fuente: BLAS, Ángel; FUENTES, Oscar; GARCÍA, Javier y SOLIS, Ulises. Sistema Ball & Beam [imagen]. En: Congreso Internacional de Robótica y Computación. Ciudad de México: Cinvestav, 2015. p.210.

4.1.3. Planificación de movimiento de bola en placa para robots de seis patas paralelas para caminar en terrenos irregulares utilizando información háptica pura ⁵

Los estudios actuales sobre el problema de la bola en el plato (BoP) se centran principalmente en plataformas con una base fija y utiliza un sistema de visión para detectar la pelota. Sin embargo, trabajos relevantes sobre las patas en los robots no están disponibles, especialmente en robots de seis patas paralelas que utilizan información háptica pura. Este documento propone un método novedoso de planificación de movimiento de la base de la pirámide para seis patas paralelas robots que caminan sobre terrenos irregulares basados en información háptica pura. Primero, se presenta un robot de seis patas paralelas con siete sensores de fuerza /par de seis dimensiones. Luego, se construye un modelo completo del sistema BoP en el robot considerando el movimiento de seis grados de libertad del cuerpo. Además, un modelo de medición del estado de la bola se construye basado en información háptica pura; y con un filtro de paso bajo, un compensador de plomo y un filtro de Kalman se aplican para extraer información útil de los ruidosos datos del sensor. Se propone un controlador de impedancia para controlar la pelota y un nuevo planificador de movimiento con cinco subplanificadores se introduce para abordar el problema de caminar sobre terrenos irregulares. Finalmente, los experimentos se realizan en el prototipo para validar el método. Los resultados muestran que el método se desempeña de manera robusta cuando el robot atraviesa terrenos irregulares.

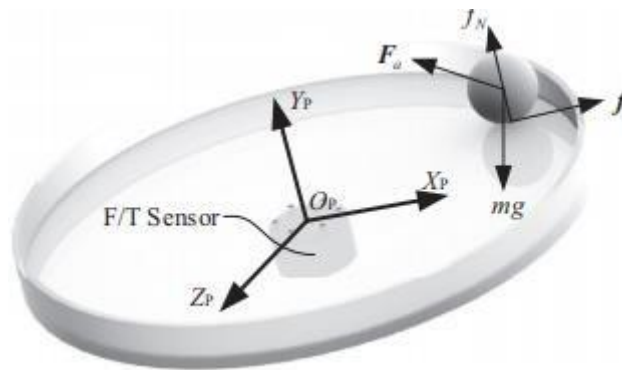


Figura 5 Análisis de fuerza de la pelota en OP-xyz

Fuente: CHEN, Zhijun; GAO, Feng; SUN, Qiao y TIAN, Yuan. Análisis de fuerza de la pelota en OP-xyz [imagen]. En: Elsevier. China: Shanghai Jiao Tong University, 2019. p.139.

⁵ CHEN, Zhijun; GAO, Feng; SUN, Qiao y TIAN, Yuan. Op.Cit.,p.136-150

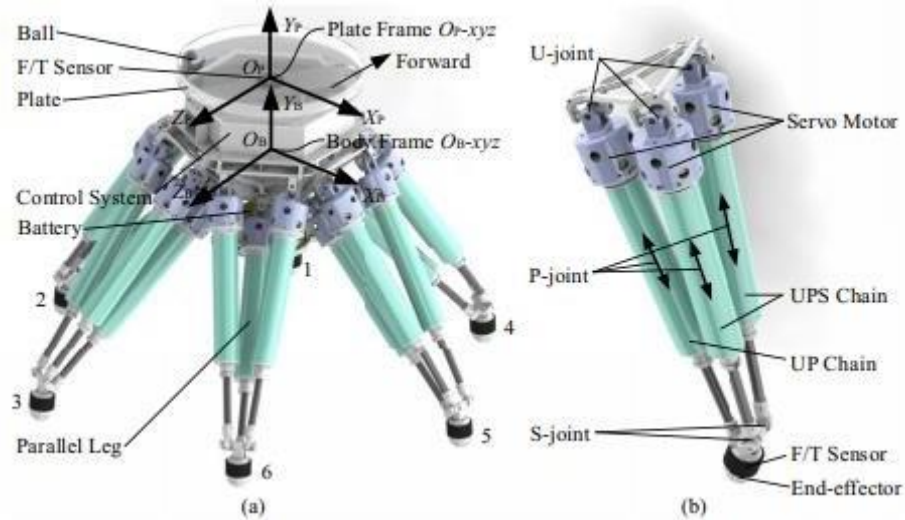


Figura 6 (a) Modelo del robot de seis patas paralelas; (b) mecanismo de la pierna.

Fuente: CHEN, Zhijun; GAO, Feng; SUN, Qiao y TIAN, Yuan. (a) Modelo del robot de seis patas paralelas; (b) mecanismo de la pierna [imagen]. En: Elsevier. China: Shanghai Jiao Tong University, 2019. p.138.

4.1.4. Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos ⁶

En este artículo se realiza un control de doble lazo para el sistema bola y viga con actuadores magnéticos, además, se presenta el diseño y la construcción del prototipo correspondiente. El control se hace en tiempo real, por medio de una tarjeta de adquisición de datos y Simulink, mediante los cuales se implementan filtros y se linealizan las señales de cuatro sensores. De otra parte, se crean los algoritmos de control para los lazos, uno, de inclinación de la viga, y dos, de posición de la bola. Se trabajan dos alternativas para la estrategia de control del lazo interno, éstas son: un PID con ganancias fijas y otro con variables. Este último entrega un mejor resultado y además permite obtener un modelo del sistema, mientras que en el lazo externo (el cual se encarga de la posición de la bola), se trabaja con un PID tradicional. La experimentación con el prototipo construido muestra que no es fácil lograr la estabilización del lazo externo, debido a la latencia del actuador magnético.

⁶ANTOLINES, José; LÓPEZ, Francy y MONROY, Paola. Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos. En: Tecnura. Vol.15, N°30, (Jul-Dic.2011); p.12-23.

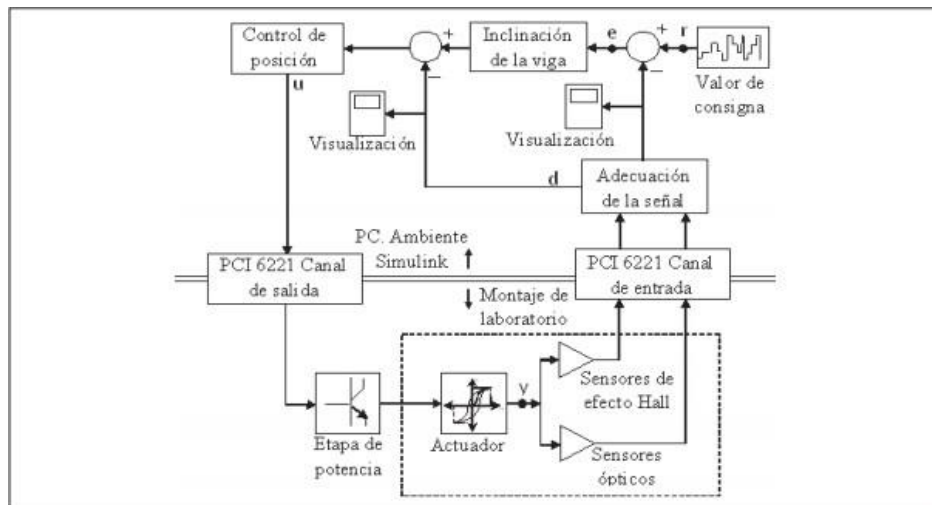


Figura 7 Configuración de doble lazo cerrado para el control de posición del sistema bola y viga. La tarjeta PCI 6221 establece la conexión entre el ambiente de la computadora y el montaje de laboratorio.

Fuente: ANTOLINES, José; LÓPEZ, Francy y MONROY, Paola. Configuración de doble lazo cerrado para el control de posición del sistema bola y viga. La tarjeta PCI 6221 establece la conexión entre el ambiente de la computadora y el montaje de laboratorio [imagen]. En: Tecnura. Vol.15, N°30, (Jul-Dic.2011). p.14.

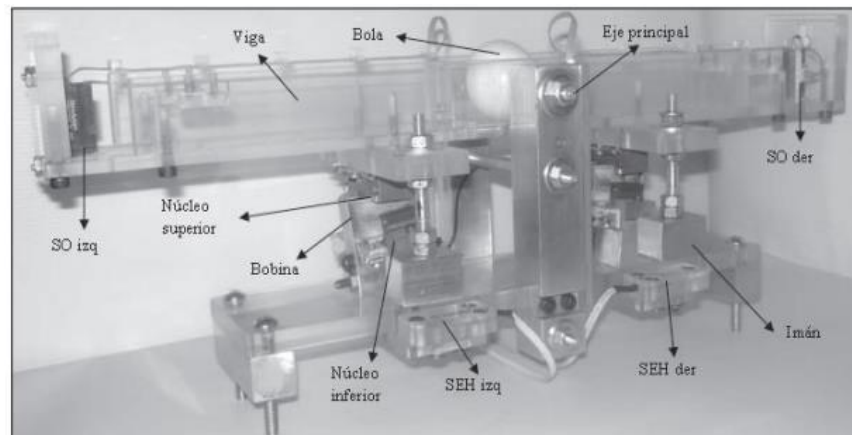


Figura 8 Prototipo final. SEH = Sensor de efecto Hall, SO = Sensor óptico.

Fuente: ANTOLINES, José; LÓPEZ, Francy y MONROY, Paola . Prototipo final. SEH = Sensor de efecto Hall, SO = Sensor óptico [imagen]. En: Tecnura. Vol.15, N°30, (Jul-Dic.2011). p.14.

4.1.5. El control de posición del sistema ball and beam utilizando el control de modo de deslizamiento difuso adaptativo basado en la observación de perturbaciones de estado en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes ⁷

Este artículo presenta un control de modo de deslizamiento difuso adaptativo (AFSMC) basado en observadores de perturbación de estado (SD) para controlar el sistema de bola y haz (BBS) en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes. Primero, un esquema SMC está diseñado para una representación del espacio de estados basada en errores del BBS que implica incertidumbres. El análisis de estabilidad muestra que el sistema de circuito cerrado con el SMC propuesto en presencia de incertidumbres tiene estabilidad asintótica global. En segundo lugar, se utiliza un observador SD de tiempo finito para estimar las incertidumbres, la velocidad de la bola que se mueve sobre la viga y la velocidad angular de la rotación de la viga. En este caso, La implementación del SMC basado en observador SD no solo elimina la dificultad de acceso a la información de las variables de estado, sino que también puede alcanzar un rango de entrada de control adecuado seleccionando coeficientes de entrada de control más pequeños. La prueba matemática demuestra que el sistema de circuito cerrado alcanza la estabilidad asintótica global utilizando el SMC basado en observador SD propuesto en presencia de incertidumbres. Finalmente, se diseña un aproximador difuso adaptativo de manera que si no se dispone de la estimación correcta del límite de incertidumbres, el sistema de circuito cerrado con el AFSMC basado en observador SD logra al menos la estabilidad limitada uniforme global. La simulación y los resultados experimentales verifican la eficiencia del método sugerido en comparación con métodos similares. La prueba matemática demuestra que el sistema de circuito cerrado alcanza la estabilidad asintótica global utilizando el SMC basado en observador SD propuesto en presencia de incertidumbres. Por último, se diseña un aproximador difuso adaptativo de modo que si no se dispone de la estimación correcta del límite de incertidumbres, el sistema de bucle cerrado con el AFSMC basado en observador SD logra al menos la estabilidad limitada uniforme global. La simulación y los resultados experimentales verifican la eficiencia del método sugerido en comparación con métodos similares. La prueba matemática demuestra que el sistema de circuito cerrado alcanza la estabilidad asintótica global utilizando el SMC basado en observador SD propuesto en presencia de

⁷REZA, Mohammad y ZAARE, Saeed. El control de posición del sistema ball and beam utilizando el control de modo de deslizamiento difuso adaptativo basado en la observación de perturbaciones de estado en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes. En: ELSEVIER. Vol.150(26 agosto 2020).

incertidumbres. Finalmente, se diseña un aproximador difuso adaptativo de manera que si no se dispone de la estimación correcta del límite de incertidumbres, el sistema de circuito cerrado con el AFSMC basado en observador SD logra al menos la estabilidad limitada uniforme global. La simulación y los resultados experimentales verifican la eficiencia del método sugerido en comparación con métodos similares. el sistema de circuito cerrado con el AFSMC basado en observador SD logra al menos la estabilidad limitada uniforme global. La simulación y los resultados experimentales verifican la eficiencia del método sugerido en comparación con métodos similares. el sistema de circuito cerrado con el AFSMC basado en observador SD logra al menos la estabilidad limitada uniforme global. La simulación y los resultados experimentales verifican la eficiencia del método sugerido en comparación con métodos similares.

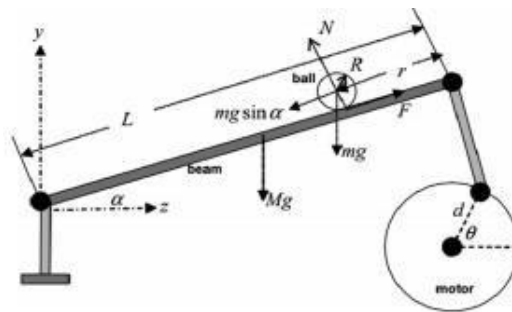


Figura 9 Diagrama esquemático del BBS

Fuente: Y. Wen, F. Ortiz. Diagrama esquemático del BBS [imagen]. En: Actas de la Conferencia IEEE 2005 sobre aplicaciones de control, 2005. CCA 2005., IEEE.

4.1.6. Diseño de controlador fraccional de dos grados de libertad: aplicación al sistema de bolas y vigas ⁸

Los ingenieros e investigadores de control enfrentan desafíos para diseñar un controlador eficiente para el sistema de bolas y vigas debido a sus propiedades no lineales e inestables. Este artículo investiga el control de orden fraccional de dos grados de libertad del sistema de bolas y vigas. Implica el método basado en modelos para diseñar los parámetros de los controladores para el modelo lineal correspondiente. Los controladores de orden fraccional están especialmente

⁸ AL-SAGGAF, Ubaid; MANSOURI, y MUSTAFA, Ibrahim. Diseño de controlador fraccional de dos grados de libertad: aplicación al sistema de bolas y vigas. En: Elsevier. Vol.135, (Noviembre,2018); p.13-22.

ajustados para tener un margen de fase constante del lazo abierto. Esta característica asegura la robustez de los controladores a las variaciones de ganancia del sistema. Este artículo presenta una evaluación y comparación adecuadas entre controladores de orden de números enteros y fraccionarios. El rendimiento de cada controlador se evalúa en términos de seguimiento del punto de ajuste, rechazo de perturbaciones y robustez. La comparación entre dos controladores se valida mediante simulación y resultados experimentales. También se indican fortalezas y debilidades en el control en tiempo real.



Figura 10 Sistema físico Ball-Beam

Fuente: Quanser Innovative Edutech, Manual de laboratorio de bolas y vigas, Quanser Inc., 2012.

4.1.7. Control de vibración de una viga flexible impulsada por una etapa de husillo de bolas con filtros de muesca adaptables y un mejorador de línea⁹

Para una viga de baja rigidez impulsada por una etapa de husillo de bolas, las vibraciones laterales no pueden controlarse adecuadamente mediante un compensador colocado basado únicamente en la retroalimentación del codificador rotatorio. Las señales de aceleración en la punta del haz flexible se miden para el control activo de la vibración además del compensador colocado. Se incluyen un filtro de paso de banda de segundo orden (un potenciador de línea) y dos filtros de muesca en el bucle de retroalimentación de aceleración para aumentar las amortiguaciones modales para el primer y el segundo modos flexibles sin excitar resonancias de alta frecuencia. Se ha diseñado un algoritmo de adaptación novedoso para sintonizar las frecuencias centrales de los filtros de muesca en tiempo real. Consiste en un filtro de paso bajo de segundo orden, un filtro de paso de banda de segundo orden y un detector de fase. La mejora del sistema de control

⁹CHEN, Sheng-Hang; LIAN, Sing-Han y WU, Shang-Teg. Control de vibración de una viga flexible impulsada por una etapa de husillo de bolas con filtros de muesca adaptables y un mejorador de línea . En: Elsevier. Vol.348, (Julio,2015); p.71-87.

se elabora de forma progresiva con los análisis del lugar de las raíces y de la parcela de bodegas, junto con una interpretación física. Se realizan pruebas exhaustivas en un dispositivo experimental para verificar la eficacia del método de control.

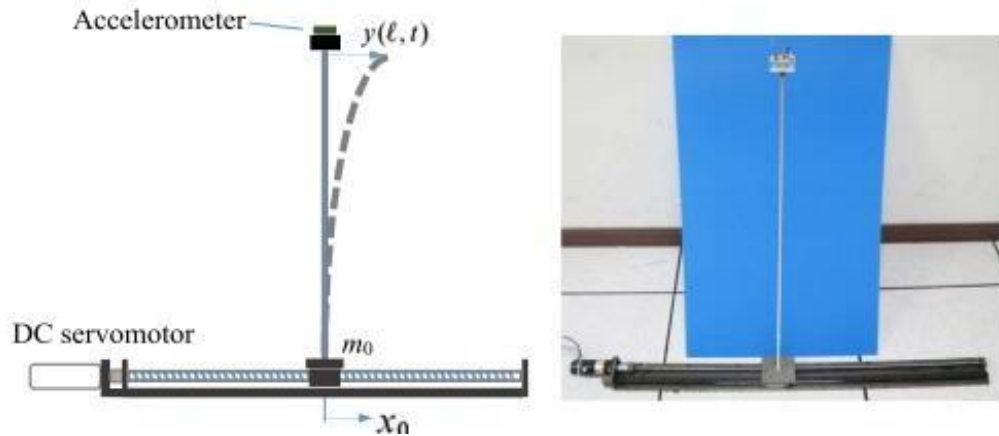


Figura 11 Dibujo esquemático y fotografía de la viga flexible accionada por una plataforma de husillo de bolas.

Fuente: CHEN, Sheng-Hang; LIAN, Sing-Han y WU, Shang-Teg. Dibujo esquemático y fotografía de la viga flexible accionada por una plataforma de husillo de bolas [imagen]. En: Elsevier. Taiwan: Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Yunlin, 2015. p.73.

4.1.8. Estabilidad del sistema de control basado en ADRC no lineal de datos muestreados con aplicación al problema de la viga esférica¹⁰

Este artículo se ocupa principalmente del análisis de estabilidad del sistema de control basado en el control de rechazo activo de perturbaciones no lineal (ADRC) de datos muestreados. En primer lugar, una clase de planta continua de entrada única y salida única (SISO) se discretiza utilizando retención de orden cero (ZOH), y se proponen recientemente varios tipos de métodos de implementación digital para el observador de estado extendido no lineal (NLESO). Luego, el sistema de circuito cerrado basado en ADRC no lineal de datos muestreados (NLADRC) se transforma en un sistema similar a Lurie de tiempo discreto, al que la desigualdad de matriz lineal (LMI) se obtienen condiciones suficientes para una estabilidad absoluta y una estabilidad absoluta robusta. Las condiciones suficientes proporcionan métodos convenientes y efectivos para determinar la estabilidad y su relación con los parámetros del controlador, la planta y el período de

¹⁰ LI, Jie; QI, Xiaohui; WAN, Hui y XIA, Yuanqing. Estabilidad del sistema de control basado en ADRC no lineal de datos muestreados con aplicación al problema de la viga esférica. En: Elsevier. Vol.355, No. 17 (Noviembre,2018); p.8537-8553.

muestreo. Utilizando el sistema de haz de bolas como ejemplo, los resultados propuestos se verifican tanto en simulaciones como en experimentos.

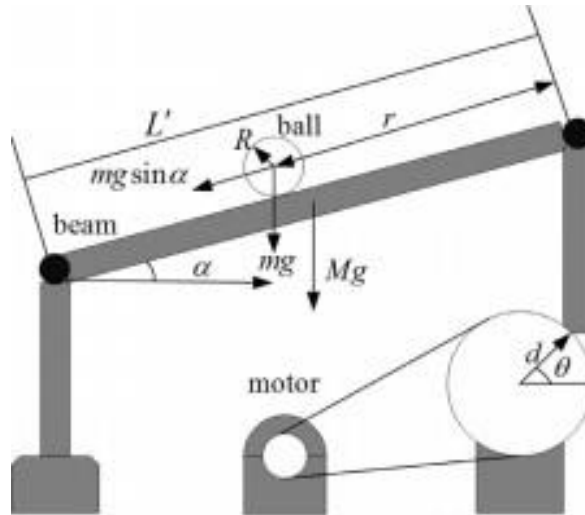


Figura 12 Diagrama esquemático del sistema viga – esfera

Fuente: LI, Jie; QI, Xiaohui; WAN, Hui y XIA, Yuanqing. Diagrama esquemático del sistema viga – esfera [imagen]. En: Elsevier. China: School of Automation, Beijing Institute of Technology, 2018. p.8547.



Figura 13 Configuración experimental del sistema de viga esférica

Fuente: LI, Jie; QI, Xiaohui; WAN, Hui y XIA, Yuanqing. Configuración experimental del sistema de viga esférica [fotografía]. En: Elsevier. China: School of Automation, Beijing Institute of Technology, 2018. p.8547.

4.1.9. Equilibrio de bola y viga impulsada por una aleación con memoria de forma: posible actuador para un control estabilizado¹¹

Se aplica un mecanismo de actuación alternativo al sistema de laboratorio de control más buscado: la bola en la viga. El sistema es impulsado por alambres de aleación con memoria de forma antagónica (SMA) que están comprometidos para desempeñar el papel de detección y actuación en bucle cerrado. El objetivo del control es gobernar la posición de la bola en la viga. La altitud angular del rayo se varía cambiando la posición lateral del rayo, mediante el control de la aceleración angular del actuador inteligente. El objetivo es estudiar el uso de SMA para sistemas con dinámicas complejas. Se implementa un controlador de modo deslizante discreto que no requiere información detallada sobre el modelo constitutivo de SMA. La resistencia diferencial de los cables SMA antagónicos medida durante el accionamiento se utiliza como señal de detección. La innovación en este trabajo es la retroalimentación directa de la señal medida que es facilitada por una electrónica de procesamiento de señal especialmente diseñada. El rendimiento del sistema de autodetección bajo accionado se ilustra a través del control de posición en tiempo real.

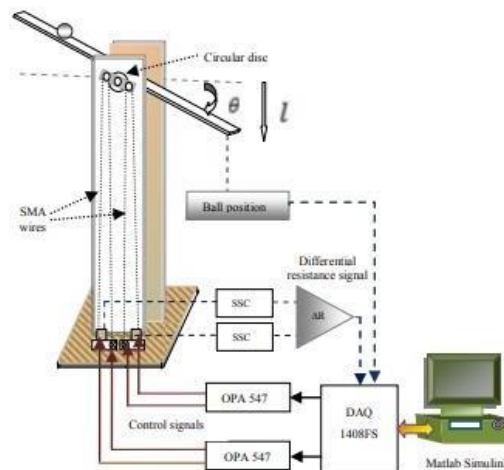


Figura 14 Diagrama de bloques esquemático

Fuente: DHANALAKSHMi, K; NAKSHATHARAN, Sunjai y SELVARANI, Josephine. Diagrama de bloques esquemático[imagen]. En: Elsevier. India: Department of Instrumentation and Control Engineering National Institute of Technology Tiruchirappalli , 2014. p.579.

¹¹ DHANALAKSHMi, K; NAKSHATHARAN, Sunjai y SELVARANI, Josephine. Equilibrio de bola y viga impulsada por una aleación con memoria de forma: posible actuador para un control estabilizado. En: Elsevier. Vol.47, No. 1 (Marzo,2014); p.577-584.

4.1.10. Modelado y control del sistema de bolas y vigas utilizando un controlador PID basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM) ¹²

Este artículo presenta una metodología de diseño de un controlador PID para un sistema inestable de bolas y vigas basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM). El sistema de bolas y vigas es un sistema no lineal, inestable, sistema de doble integración que se utiliza ampliamente como una configuración de control de referencia para evaluar varias estrategias de control. Muchos diseños de controladores PID se desarrollan para sistemas estables, sin embargo, es muy menos común para sistemas inestables de doble integración. El método de diagrama de coeficiente (CDM) es una de las metodologías de diseño de controladores desarrolladas recientemente que se basa en un enfoque algebraico. Con CDM, es fácil realizar un controlador en las condiciones de estabilidad, robustez y rendimiento en el dominio del tiempo. En este artículo, los parámetros del controlador PID (CDM-PID) basados en CDM se calculan en función de la dinámica del sistema de bolas y vigas que se desarrolla utilizando el enfoque Euler - Lagrangiano. Para evaluar el rendimiento del controlador CDM-PID propuesto, se lleva a cabo el seguimiento del punto de ajuste y el análisis de rechazo de perturbaciones del sistema de bolas y vigas mediante ejecuciones de simulación en la plataforma MATLAB-SIMULINK. Los resultados se comparan con el controlador convencional Ziegler Nicholas - PID (ZN-PID) en términos de índices de error (error cuadrado integral (ISE) y error absoluto integral (IAE)) e índices de calidad (tiempo de subida (t_r), tiempo de establecimiento (t_s) y sobrepaso de pico máximo (% M_p)). Los resultados revelan que el controlador CDM-PID mantiene una buena estabilidad de la posición de la pelota con un porcentaje de error reducido que el controlador ZN-PID.

¹² B., Meenakshipriya y K., Kalpana. Modelado y control del sistema de bolas y vigas utilizando un controlador PID basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM). En: Elsevier. Vol.47, No. 1 (Marzo,2014); p.620-626.

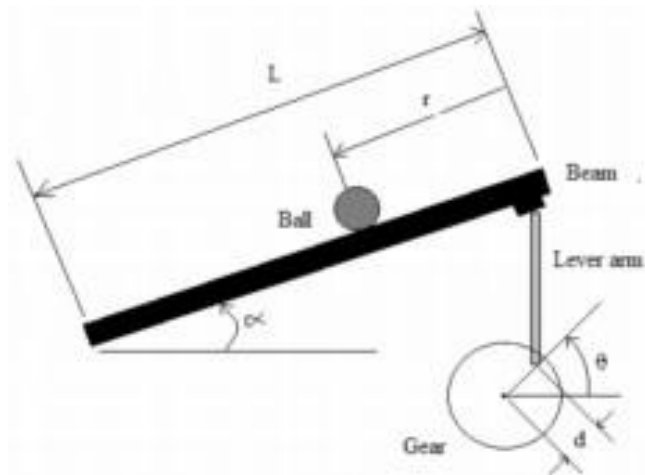


Figura 15 Sistema de bolas y vigas

Fuente: B., Meenakshipriya y K., Kalpana. Sistema de bolas y vigas [imagen]. En: Elsevier. India: Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Kongu Engineering College, 2014. p.621.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida, activando un motor, encendiendo un LED, publicando algo en línea. Puede decirle a su tablero qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador en el tablero. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el Software Arduino (IDE) , basado en Processing.

Arduino nació en el Ivrea Interaction Design Institute como una herramienta fácil para la creación rápida de prototipos, dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación. Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciando su oferta desde placas simples de 8 bits hasta productos para aplicaciones de IoT, wearable, impresión 3D y entornos integrados. Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlas de forma independiente y eventualmente adaptarlas a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto y está creciendo gracias a las contribuciones de los usuarios de todo el mundo.

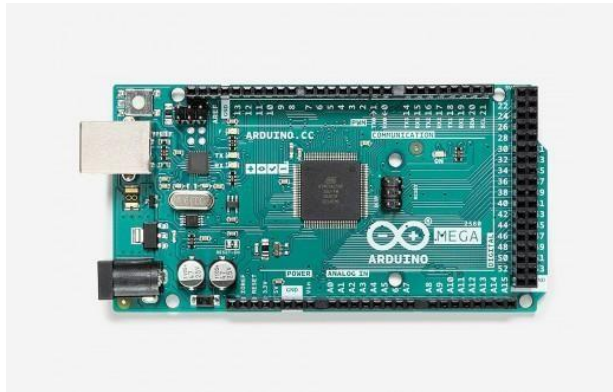


Figura 16 ARDUINO MEGA 2560

Fuente: Arduino. Arduino mega 2560. [en línea] <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

4.2.2. Matlab

Se toma como base el libro “Matlab para ingenieros”¹³, el cual dice que MATLAB es una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el comercio para resolver problemas de matemáticas, tales como Maple, Mathematica y MathCad. A pesar de lo que afirman sus defensores, ninguna de ellas es “la mejor”. Todas tienen fortalezas y debilidades. Cada una permitirá efectuar cálculos matemáticos básicos, pero difieren en el modo como manejan los cálculos simbólicos y procesos matemáticos más complicados, como la manipulación de matrices. Por ejemplo, MATLAB es superior en los cálculos que involucran matrices, mientras que Maple lo supera en los cálculos simbólicos. El nombre mismo de MATLAB es una abreviatura de Matrix Laboratory, laboratorio matricial. En un nivel fundamental, se puede pensar que estos programas son sofisticadas calculadoras con base en una computadora. Son capaces de realizar las mismas funciones que una calculadora científica, y muchas más.

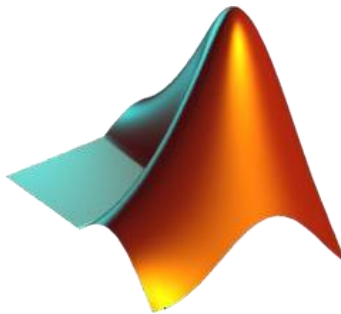


Figura 17 Logo de Matlab. Fuente: The MathWorks, Inc. Logo de Matlab [imagen]. [sitio web]. 1994. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

¹³ MOORE, Holly. MATLAB para ingenieros. Estados Unidos. Pearson Prentice Hall. Febrero, 2018. p.2.

Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

4.2.3. Teorema de Nyquist

Si una señal continua, $S(t)$, tiene una banda de frecuencia tal que $F_{\text{máx}}$ sea la mayor frecuencia comprendida dentro de dicha banda, dicha señal podrá reconstruirse sin distorsión a partir de muestras de la señal tomadas a una frecuencia f_s siendo $f_s > 2 F_{\text{máx}}$. En la Figura 2 se muestra un esquema simplificado del proceso de muestreo.¹⁴

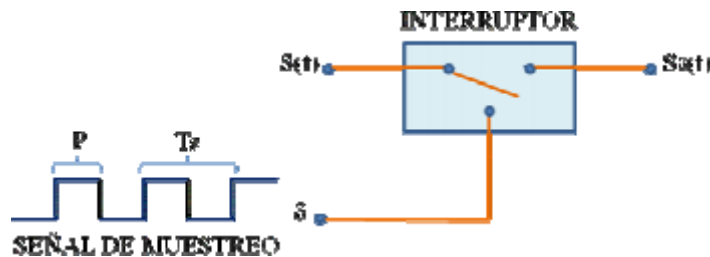


Figura 18 Esquema simplificado del proceso de muestreo

Fuente: CANO GARZON, Hugol; CHAVES OSORIO, Andres y CORTES OSORIO, Alexander. Esquema simplificado del proceso de muestreo [imagen]. En: Scientia Et Technica. Vol.2, N°39, (1 de agosto de 2008).p.38.

4.2.4. HMI

La HMI representa el medio de interacción entre un usuario y un determinado hardware, para el caso de control de procesos la HMI, debe ser capaz de mostrar al usuario datos básicos de todo sistema de control de procesos, tales como variable de proceso, variable de control y set point o variable de consigna, todo esto

¹⁴ CANO GARZON, Hugo; CHAVES OSORIO, Andres y CORTES OSORIO, Alexander. Fundamentos y aplicación del muestreo en señales ubicadas en las bandas altas del espectro. En: Scientia Et Technica. Vol.2, N°39, (1 de agosto de 2008). p.38.

presentado a tiempo real, es decir en el momento mismo de la ejecución de las diferentes variaciones.¹⁵

Se recomienda que una HMI contenga tanto componentes gráficos como componentes numéricos. Asimismo, debe utilizarse terminología estandarizada y clara para el usuario final. También, se recomienda que las variables de proceso, set point y variable de control sean lo más clara posible para el usuario; asimismo, se debe mantener un registro histórico de las variaciones ocurridas, esto con el fin de estudiar su comportamiento y poder realizar las predicciones respectivas.

Un HMI debe proporcionar una explicación transparente y oportuna en tiempo real. de lo que ocurre en el proceso.



Figura 19 Interfaz HMI desarrollada en graphworx

Fuente: CHUNG PINZÁS, Alfonso Ramón; INCHE MITMA, Jorge Luís y RUÍZ LIZAMA, Edgar. Interfaz HMI desarrollada en graphworx [imagen]. En: Industrial Data. Vol. 11, núm.1. Abril, 2008. p.72.

4.2.5. Aplicación de algoritmos de control clásico, adaptable y robusto a sistemas dinámicos de parámetros variables ¹⁶

Existen múltiples sistemas dinámicos cuyos modelos matemáticos se caracterizan por ser de primer orden y parámetros variables con el tiempo. En estos casos las

¹⁵ Ruíz Lizama, Edgar e Inche Mitma, Jorge Luís y Chung Pinzás, Alfonso Ramón y (2008), "Desarrollo de una interfaz hombre orientada al control de procesos". Datos industriales, Vol. 11, núm.1. p.71.

¹⁶ BÁEZ PRIETO, Raúl; REGALÓN ANIAS, Orlando; Rodríguez, Milagros y Rodríguez, Vladímir. Aplicación de algoritmos de control clásico, adaptable y robusto a sistemas dinámicos de parámetros variables. En: Ingeniería Energética. Vol.33, No. 3. 2012 Septiembre – Diciembre. p. 184-195.

herramientas clásicas no siempre logran un sistema de control que sea estable, posea un buen desempeño dinámico y rechace adecuadamente las perturbaciones, cuando el modelo de la planta se desvía del nominal, para el cual se realizó el diseño. En este trabajo se evalúa el comportamiento de tres estrategias de control en presencia de variación de parámetros. Estas son: control clásico, control adaptable y control robusto. Se realiza un estudio comparativo de las mismas en cuanto a complejidad del diseño, costo computacional de la implementación y sensibilidad ante variaciones en los parámetros y/o presencia de disturbios. Se llega a conclusiones que permiten disponer de criterios para la elección más adecuada, en dependencia de los requerimientos dinámicos que la aplicación demande, así como de los medios técnicos de que se disponga.

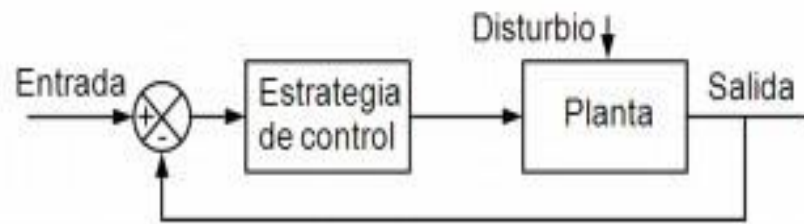


Figura 20 Diagrama de bloques del sistema bajo estudio

Fuente: BÁEZ PRIETO, Raúl; REGALÓN ANIAS, Orlando; Rodríguez, Milagros y Rodríguez, Vladímir. Diagrama de bloques del sistema bajo estudio [imagen]. En: Ingeniería Energética. Vol.33, No. 3. 2012 Septiembre – Diciembre. p. 186.

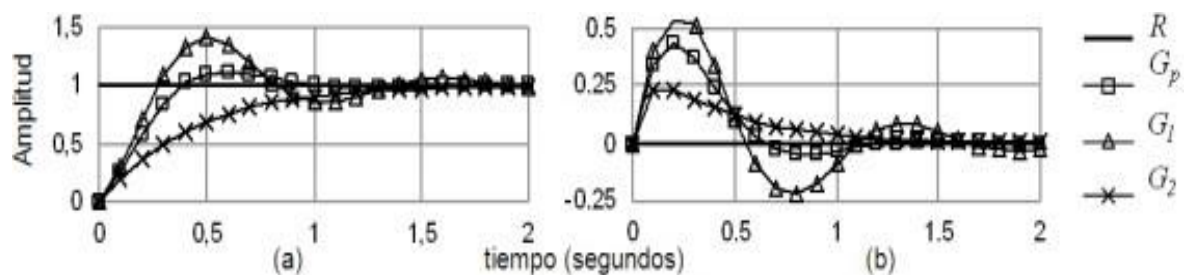


Figura 21 Respuesta de los modelos $G_p(s)$, $G_1(s)$ y $G_2(s)$ con estrategia de control clásico:
(a) – ante un paso escalón en la referencia. (b) – ante un paso escalón en el disturbio.

Fuente: BÁEZ PRIETO, Raúl; REGALÓN ANIAS, Orlando; Rodríguez, Milagros y Rodríguez, Vladímir. Respuesta de los modelos $G_p(s)$, $G_1(s)$ y $G_2(s)$ con estrategia de control clásico: (a) – ante un paso escalón en la referencia. (b) – ante un paso escalón en el disturbio [imagen]. En: Ingeniería Energética. Vol.33, No. 3. 2012 Septiembre – Diciembre. p. 186.

4.2.6. Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos ¹⁷

La identificación en lazo cerrado de sistemas continuos es un problema de optimización no lineal que resulta de difícil solución mediante métodos convencionales. En este trabajo se propone el uso de algoritmos genéticos (AG) para esta tarea y se muestra mediante simulaciones que los modelos obtenidos pueden reproducir fielmente el comportamiento de la planta, aun en el caso de sistemas inestables o que presentan algún tipo de no-linealidad. Estos modelos pueden utilizarse para el ajuste de parámetros de reguladores PID mediante un método también basado en AG, como se muestra en dos ejemplos: un sistema inestable en lazo abierto y otro de alto orden con retardo. La metodología propuesta se aplica también a la identificación del modelo AC5A de la IEEE para unidades de generación eléctrica, que incluye una no-linealidad del tipo saturación.

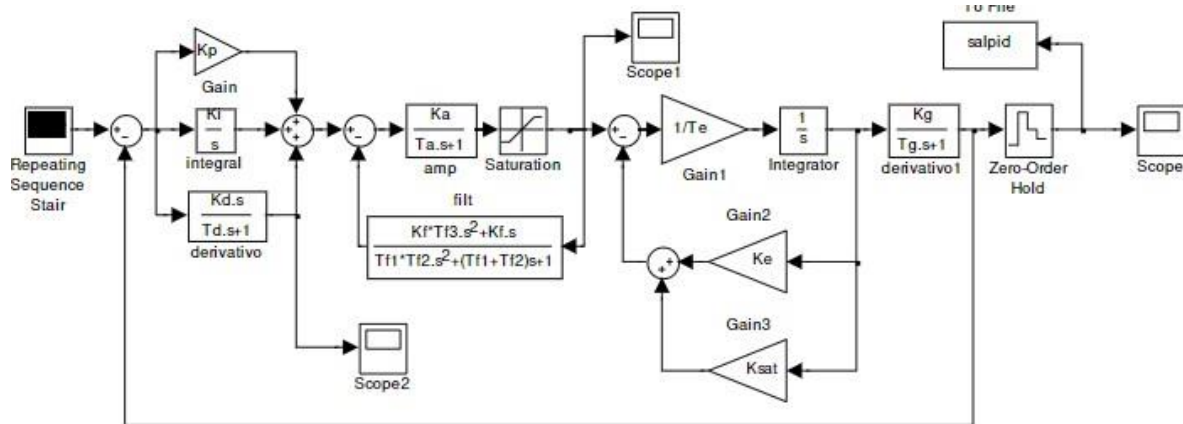


Figura 22 Representación mediante Simulink del modelo AC5A de unidades de excitación-generación eléctrica controlado mediante un PID

Fuente: AGUADO, Alberto y CIPRIANO, Aldo. Representación mediante Simulink del modelo AC5A de unidades de excitación-generación eléctrica controlado mediante un PID [imagen]. En: Revista Iberoamericana de automática e informática industrial. Vol.6, No. 1. Enero 2009. p. 24.

¹⁷ AGUADO, Alberto y CIPRIANO, Aldo. Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos. En: Revista Iberoamericana de automática e informática industrial. Vol.6, No. 1. Enero 2009. p. 20-30.

4.2.7. Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces¹⁸

Los polos en lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica. Si esta tiene un grado superior a 3, es muy laborioso encontrar sus raíces y se requerirá de una solución con computadora. (MATLAB proporciona una solución sencilla para este problema.). Sin embargo, simplemente encontrar las raíces de la ecuación característica puede tener un valor limitado, debido a que a medida que varía la ganancia de la función de transferencia en lazo abierto, la ecuación característica cambia y deben repetirse los cálculos.

W. R. Evans diseñó un método sencillo para encontrar las raíces de la ecuación característica, que se utiliza ampliamente en la ingeniería de control. Este método se denomina método del lugar de las raíces, y en él se representan las raíces de la ecuación característica para todos los valores de un parámetro del sistema.

A continuación se pueden localizar sobre la gráfica resultante las raíces correspondientes a un valor determinado de este parámetro. Observe que el parámetro es, por lo general, la ganancia, aunque es posible usar cualquier otra variable de la función de transferencia en lazo abierto. A menos que se indique lo contrario, aquí se supondrá que la ganancia de la función de transferencia en lazo abierto es el parámetro que puede adoptar todos los valores, de cero a infinito.

Mediante el método del lugar de las raíces, el diseñador puede predecir los efectos que tiene en la localización de los polos en lazo cerrado, variar el valor de la ganancia o añadir polos y/o ceros en lazo abierto. Por tanto, es conveniente que el diseñador comprenda bien el método para generar los lugares de las raíces del sistema en lazo cerrado, ya sea de forma manual o mediante el uso de programas de computadora como MATLAB.

¹⁸ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. Quinta edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.270.

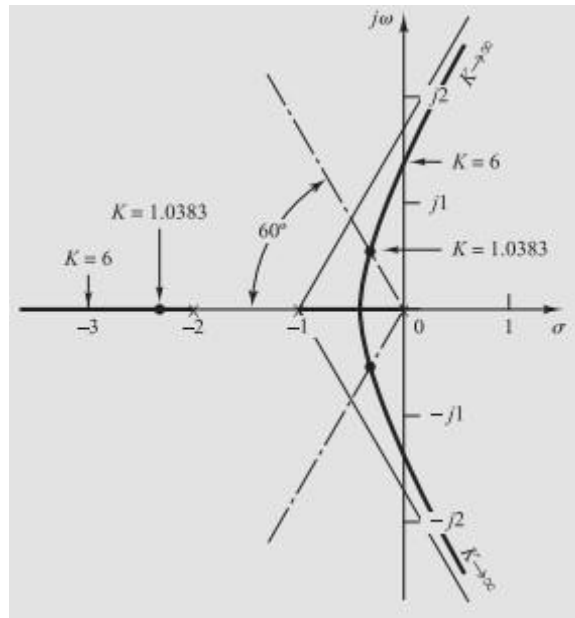


Figura 23 Gráfica del lugar de las raíces

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Gráfica del lugar de las raíces [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.290.

4.2.8. Análisis y diseño de sistemas de control por el método de la respuesta en frecuencia¹⁹

Los métodos de respuesta en frecuencia fueron desarrollados en los años 1930 y 1940 por Nyquist, Bode y Nichols, entre otros. Los métodos de respuesta en frecuencia son los más potentes en la teoría de control convencional. También son indispensables para la teoría de control robusto.

El criterio de estabilidad de Nyquist permite averiguar la estabilidad relativa y absoluta de los sistemas lineales en lazo cerrado a partir del conocimiento de sus características de frecuencia en lazo abierto. Una ventaja del método de la respuesta en frecuencia es que las pruebas de la respuesta en frecuencia son, en general, sencillas y pueden ser muy precisas con el uso de generadores de señales sinusoidales y un equipo de medición preciso. A menudo las funciones de transferencia de los componentes complicados se determinan experimentalmente mediante pruebas de la respuesta en frecuencia. Además, este método tiene la ventaja de que permite diseñar un sistema en el que se eliminen los efectos no deseados del ruido así como extender este análisis y diseñar a ciertos sistemas de control no lineales.

¹⁹ Ibid., p.403

4.2.9. Diagramas de Bode ²⁰

Un diagrama de Bode está formado por dos gráficas: una es la gráfica del logaritmo de la magnitud de la función de transferencia sinusoidal, y la otra es la gráfica del ángulo de fase; ambas se dibujan contra la frecuencia en escala logarítmica.

La ventaja principal de utilizar el diagrama de Bode es que la multiplicación de magnitudes se convierte en suma. Además, cuenta con un método simple para dibujar una curva aproximada de magnitud logarítmica. Se basa en aproximaciones asintóticas. Esta aproximación, mediante asíntotas (líneas rectas), es suficiente si sólo se necesita información general sobre la característica de la respuesta en frecuencia. Si se desea obtener curvas exactas, es fácil corregir las curvas asintóticas. Es muy útil ampliar el rango de bajas frecuencias mediante el uso de una escala logarítmica, debido a que las características de las bajas frecuencias son las más importantes en los sistemas prácticos. Aunque no es posible dibujar las curvas hasta una frecuencia cero, debido a la frecuencia logarítmica ($\log 0 = -\infty$), esto no es un problema serio.

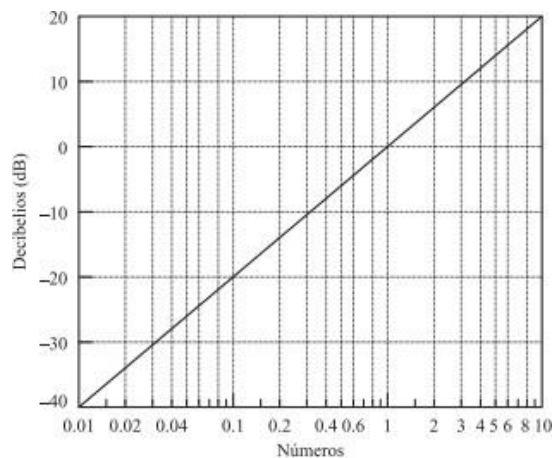


Figura 24 Línea de conversión de números a decibelios

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Línea de conversión de números a decibelios [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.404.

²⁰ Ibid., p.403

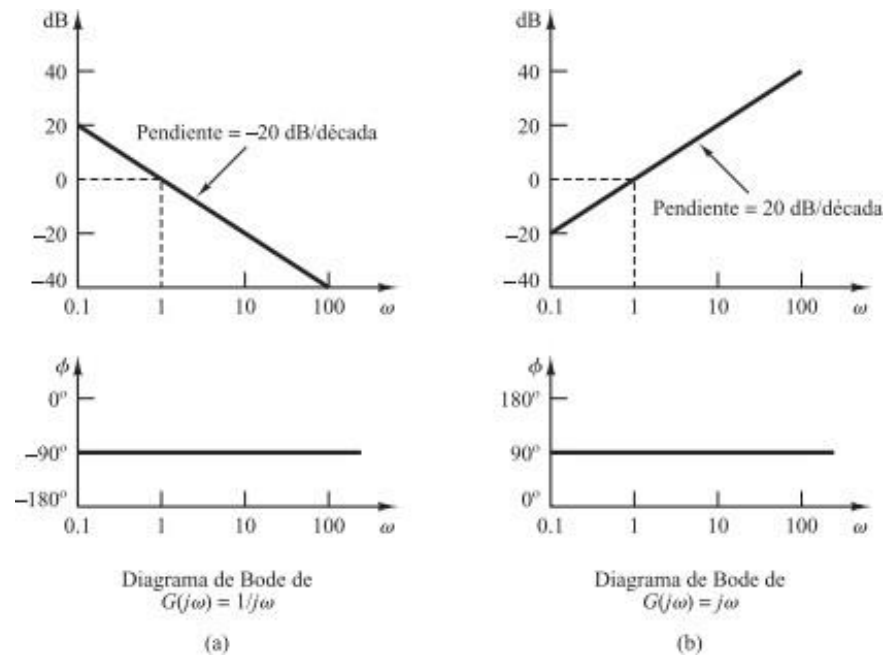


Figura 25 (a) Diagrama de Bode de $G(j\omega) = 1/j\omega$; (b) diagrama de Bode de $G(j\omega) = j\omega$.

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Línea de conversión de números a decibelios [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.406.

4.2.10. Diseño de controladores PID mediante el método de respuesta en frecuencia ²¹

Diséñese un controlador PID utilizando el método de la respuesta en frecuencia tal que la constante de error estático en velocidad sea 4 seg⁻¹, el margen de fase sea de al menos 50 grados y el margen de ganancia de al menos 10 dB. Obténgase las curvas de respuesta a un escalón unitario del sistema controlado con un PID en MATLAB.

²¹ Ibid., p.577-582

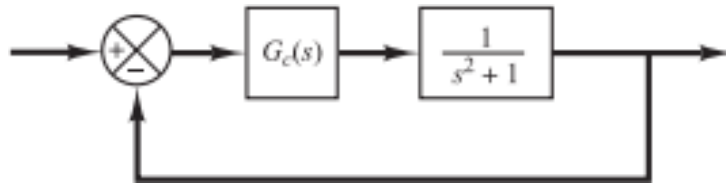


Figura 26 Sistema de control

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Línea de conversión de números a decibelios [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.578.

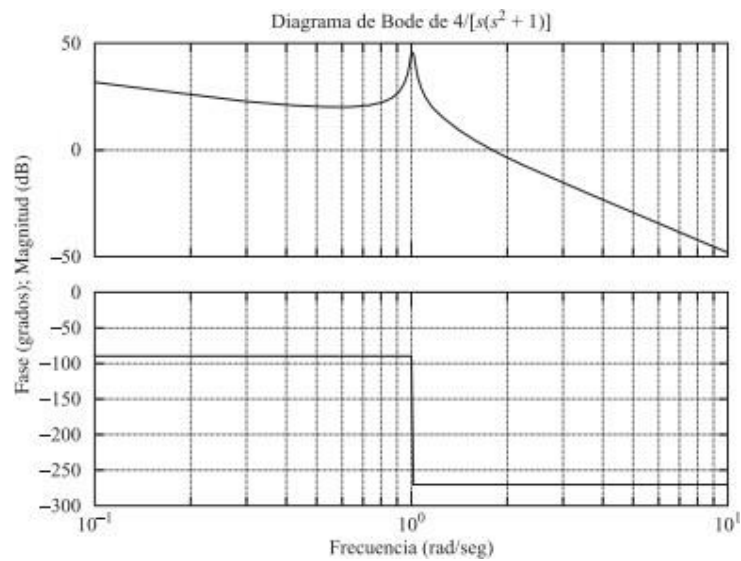


Figura 27 Diagrama de Bode

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Línea de conversión de números a decibelios [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.578.

A continuación, se obtendrán las respuestas a un escalón unitario del sistema diseñado. La función de transferencia en lazo cerrado es

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{5s^2 + 21s + 4}{s^3 + 5s^2 + 22s + 4}$$

Observe que los ceros en lazo cerrado están localizados en

$$s = -4, \quad s = -0.2$$

Los polos en lazo cerrado se encuentran en

$$s = -2.4052 + j3.9119$$

$$s = -2.4052 - j3.9119$$

$$s = -0.1897$$

Observe que el polo en lazo cerrado en $s = -0.1897$ y el cero en $s = -0.2$ producen una larga cola de pequeña amplitud en la respuesta a un escalón unitario.

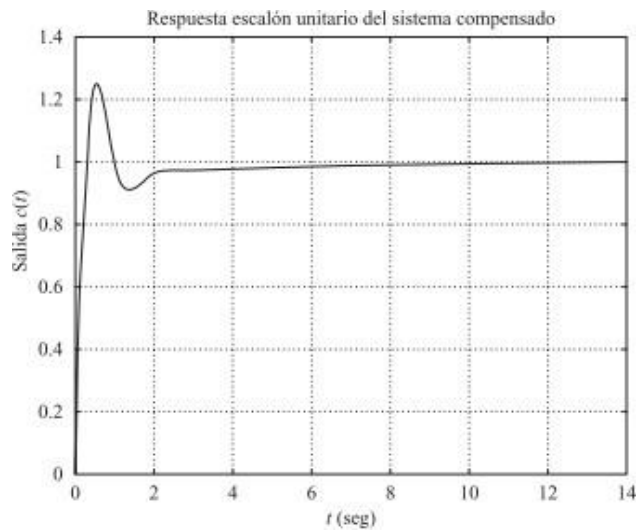


Figura 28 Curva de respuesta a un escalón unitario

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Línea de conversión de números a decibelios [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.582.

4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS BALL AND BEAM

Tabla 1 Análisis del estado de arte. Autoría propia

Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi	
ESTRUCTURA	La estructura consta de un marco exterior gobernado por un actuador que será el encargado de hacer rotar a la plataforma en el eje X. Asimismo, el plato se encuentra incrustado en un marco interior dirigido por el otro actuador, que lo hace rotar a lo largo del eje Y. De este modo quedan definidos todos los grados de libertad de la estructura, asegurando la perpendicularidad de los ejes de coordenadas y su independencia de movimiento.
SENSORICA	Como elemento de medición se utiliza una cámara web y un panel táctil resistivo.
MICROPROCESADOR	Se trabaja con Raspberry PI

ACTUADOR	Como elemento final de control se utiliza servomotores
CONTROLADOR	Se opta por un controlador PID
El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de robótica	
ESTRUCTURA	El prototipo utilizado fue construido a partir de placas de Sintra (PVC espumado), cortadas y ensambladas como se muestra en la fotografía. La estructura base contiene ranuras para montar el actuador, cableado y sensores.
SENSORICA	Se utiliza un sensor resistivo que funciona de manera similar a un potenciómetro, este utiliza como elemento resistivo una cuerda de guitarra número cuatro la cual varía su resistencia (en los 30cm de longitud que se usan como sensor) entre 0.2 ohmio y 160 ohmio. La bola de acero cierra el circuito y mediante una barra de bronce (con resistencia despreciable) que actúa como riel en conjunto con la cuerda y de este modo permite obtener una medición de la posición de la bola en la barra (riel formado por la barra de bronce y cuerdas) a través de una variación de voltaje que es medida a través de un convertidor análogo digital.
MICROPROCESADOR	Se trabaja con un Arduino Mega 2560.
ACTUADOR	El actuador es un servo motor de marca Hitec modelo HS-311.
CONTROLADOR	El controlador implementado es utilizando ecuaciones de espacio de estados llevándolas a tiempo discreto.
Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos	
ESTRUCTURA	se construye principalmente en acrílico, elemento ideal para trabajar con los sensores ópticos, además, la viga tiene forma de U, lo que permite que la bola se desplace en un sólo eje. A este desplazamiento por un solo eje se lo denomina un grado de libertad. Se construyen piezas, las que se insertan en los laterales de la viga, con el propósito de limitar el movimiento de la bola y garantizar el rango de funcionamiento de los sensores ópticos, los cuales deben estar alejados como mínimo 3 cm de la superficie reflectora. Otro material predominante en la planta es el aluminio, que no interfiere en la medida de los sensores, debido a su naturaleza paramagnética, éste se usa en los soportes de la viga y de los núcleos inferiores de los actuadores, además en una caja en la que se introducen los imanes, que se ubican en paralelo con los actuadores.
SENSORICA	Sensor de efecto Hall.
MICROPROCESADOR	Tarjeta PCI-6221.

ACTUADOR	Se genera el torque a través de un actuador magnético, el cual está compuesto por dos núcleos ferromagnéticos en forma de E, con una bobina por núcleo.
CONTROLADOR	Un control PID para el lazo interno y un control PD para el lazo externo.
El control de posición del sistema ball and beam utilizando el control de modo de deslizamiento difuso adaptativo basado en la observación de perturbaciones de estado en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes	
ESTRUCTURA	La viga está construida en madera, y está unida por medio de dos barras metálicas a un servomotor, el sensor se coloca en paralelo con la altura de la bola para su debida medición.
SENSORICA	Un sensor ultrasónico.
MICROPROCESADOR	La placa Arduino Genuino Uno
ACTUADOR	Como E.F.C. se utiliza un servomotor
CONTROLADOR	Un control de modo de deslizamiento difuso adaptativo
Diseño de controlador fraccional de dos grados de libertad: aplicación al sistema de bolas y vigas	
ESTRUCTURA	Hay dos grados de libertad en este sistema: la pelota rodando arriba y abajo de la viga y la viga misma girando a través de su eje conectado. La inclinación de la viga (α) puede ser cambiado debido a la conexión de la viga con un brazo de nivel que se mueve hacia arriba y hacia abajo de acuerdo con el cambio del ángulo de posición del motor (θ). La viga consiste en una varilla de acero en paralelo con una resistencia de alambre de níquel-cromo enrollada, que forma la pista sobre la cual la bola de metal puede rodar libremente (Quanser, 2008). La posición de la bola actúa al rodar como un potenciómetro.
SENSORICA	Se utiliza un sensor resistivo que funciona de manera similar a un potenciómetro.
MICROPROCESADOR	La placa de adquisición de datos DAQ.
ACTUADOR	como E.F.C. se utiliza un servomotor CC
CONTROLADOR	Un controlador PID
Equilibrio de bola y viga impulsada por una aleación con memoria de forma: posible actuador para un control estabilizado	
ESTRUCTURA	El actuador de alambre SMA está configurado para accionar el manipulador articulado centralmente para un movimiento angular bidireccional. Un extremo del eje tiene un disco circular estático de 3,2

	cm de radio en el que se disponen en diagonal dos poleas estáticas. Dos cables SMA están conectados a poleas separadas en antagonismo para aplicar fuerzas alternativamente, en dirección opuesta a fin de rastrear la señal de entrada. Este mecanismo traduce la tensión en el SMA a un par en el eje (par de actuación), por lo tanto, un desplazamiento angular del haz de ± 30 o con respecto al 0 o eje de referencia. Cada bucle de cable SMA tiene una disposición mecánicamente paralela pero eléctricamente en serie, por lo que ofrece el doble de tensión y fuerza, además de facilitar la conexión.
SENSORICA	alambres de aleación con memoria de forma antagónica (SMA)
MICROPROCESADOR	Módulo de adquisición de data DAQ 1408FS
ACTUADOR	actuador de alambre SMA está configurado para accionar el manipulador articulado centralmente para un movimiento angular bidireccional
CONTROLADOR	control de modo deslizante de tiempo discreto
Modelado y control del sistema de bolas y vigas mediante diagrama de coeficientes Controlador PID basado en método (CDM)	
ESTRUCTURA	El sistema de bolas y vigas que se muestra en la figura 1 está compuesto por una base, una viga, una bola, un brazo de palanca, un bloque de soporte y un engranaje motorizado. La viga está conectada al bloque de soporte que se fija en un lado y en el otro lado se adjunta un brazo de palanca móvil que a su vez es controlado por el motor de cepillo de CC a través de la polea de la correa. La bola se coloca en la viga y puede rodar libremente a lo largo de toda la viga. Al aplicar una señal de control eléctrica al motor, el rayo puede inclinarse sobre su eje con cierto ángulo. El movimiento de la viga hará que la bola ruede a lo largo de la viga con una aceleración proporcional al ángulo de la viga.
SENSORICA	sensor de potenciómetro lineal que detecta la posición actual lineal real de la bola en el rayo

MICROPROCESADOR	se lleva a cabo el seguimiento del punto de ajuste y el análisis de rechazo de perturbaciones del sistema de bolas y vigas a través de ejecuciones de simulación en la plataforma MATLAB-SIMULINK
ACTUADOR	motor que consta de un codificador incremental óptico giratorio
CONTROLADOR	PID para un sistema inestable de bolas y vigas basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM).
Laboratorio de control basado en la web: el sistema de bolas y vigas	
ESTRUCTURA	Hay dos grados de libertad en este sistema: la pelota rodando arriba y abajo de la viga y la viga misma girando a través de su eje conectado. La inclinación de la viga (α) puede ser cambiado debido a la conexión de la viga con un brazo de nivel que se mueve hacia arriba y hacia abajo de acuerdo con el cambio del ángulo de posición del motor (θ). La viga consiste en una varilla de acero en paralelo con una resistencia de alambre de níquel-cromo enrollada, que forma la pista sobre la cual la bola de metal puede rodar libremente (Quanser, 2008). La posición de la bola actúa al rodar como un potenciómetro.
SENSORICA	Se utiliza un sensor resistivo que funciona de manera similar a un potenciómetro
MICROPROCESADOR	Los equipos físicos generalmente son controlados por una computadora externa conectada a través de tarjetas de adquisición de datos (DAQ)
ACTUADOR	como E.F.C. se utiliza un servomotor CC
CONTROLADOR	se implementaron controladores de tipo Robust, Fuzzy y PD-Reset Control

Se desarrolla un análisis (figura 2-5) el cual proporciona el porcentaje que se tiene de cada tipo de control, tipo de microprocesador, tipo de actuador y tipo de sensorica respecto al total de datos obtenidos.

4.3.1. Tipo de control

Tabla 2 Datos de los diferentes tipos de control. Autoría propia

Tipo de Control	Numero	Porcentaje
PID CLASICO	4	50
ECUACIONES DE ESTADOS	1	12,5
DESLIZAMIENTO DIFUSO ADAPTATIVO	1	12,5
MODO DEZLIZANTE TD	1	12,5
FUZZY	1	12,5



Figura 29 Gráfico de anillo del tipo de control. Autoría propia

4.3.2. Tipo de microprocesador

Tabla 3 Datos de los diferentes tipos de microprocesadores. Autoría propia

TIPO DE MICROPROCESADOR	NUMERO	PORCENTAJE
RASPBERRY PI	1	12,5
PLACA ARDUINO (MEGA, UNO)	3	37,5
TARJETA PCI 6221	1	12,5
PLACA DAQ	3	37,5

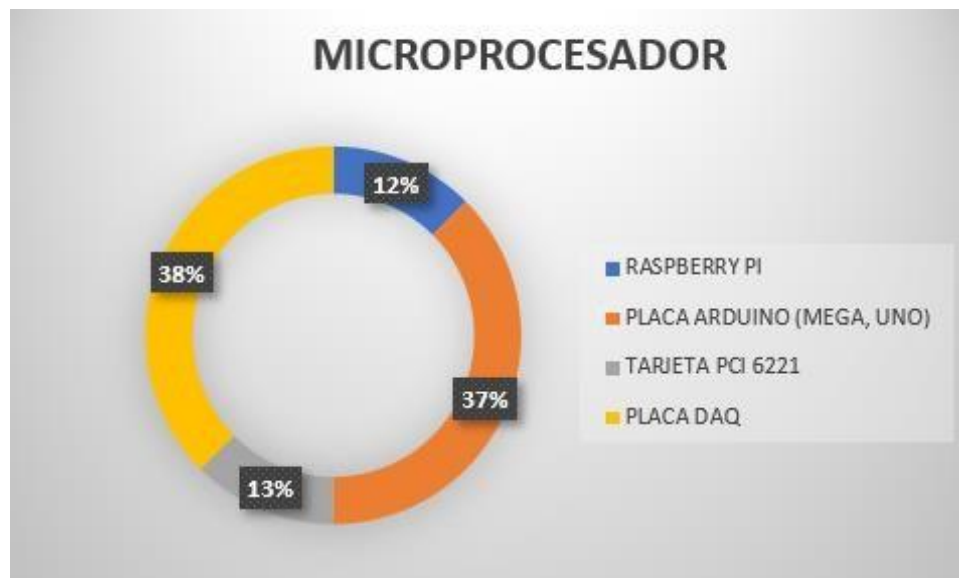


Figura 30 Gráfico de anillo del tipo de microprocesador. Autoría propia

4.3.3. Tipo de actuador

Tabla 4 Datos de los diferentes tipos de actuadores. Autoría propia

TIPO DE ACTUADOR	NUMERO	PORCENTAJE
SERVOMOTORES	6	75
ACTUADOR MAGNETICO	1	12,5
ALAMBRE SMA	1	12,5



Figura 31 Gráfico de anillo del tipo de actuador. Autoría propia

4.3.4. Tipo de sensorica

Tabla 5 Datos de los diferentes tipos de sensores. Autoría propia

TIPO DE SENSORICA	NUMERO	PORCENTAJE
SENSOR DE EFECTO HALL	1	12,5
POTENCIÓMETRO	4	50
CAMARA WED	1	12,5
ULTRASÓNICO	1	12,5
ALAMBRE SMA	1	12,5

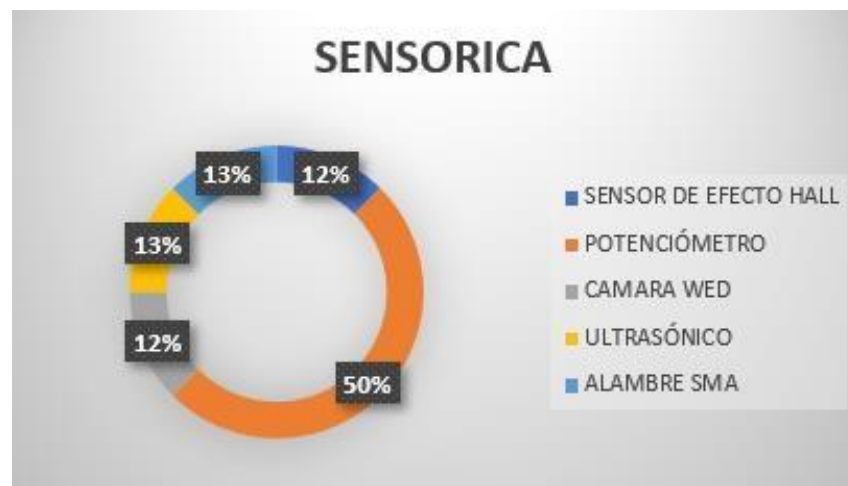


Figura 32 Gráfico de anillo del tipo de sensorica. Autoría propia

CAPITULO 2

5. INGENIERIA CONCEPTUAL Y DE DETALLE

5.1. INGENIERIA CONCEPTUAL

5.1.1. Criterios de diseño

- Requerimientos del sensor de distancia: es de vital importancia que tenga la capacidad de medir distancias con una resolución alrededor de $\pm 0,3$ mm.
- Soporte de la planta: la base debe ser de un material resistente, ya que debe soportar todos los componentes de la planta.
- Requerimientos de la pantalla: lo ideal es que tenga un buen tamaño y resolución, los cuales permitirán una mejor visualización en la retroalimentación con el operario, además respecto al software se requiere un programa que sea compatible con el microcontrolador seleccionado y a su vez que este tenga variedad de librerías y funciones que nos permita ejecutar de mejor manera el HMI.
- Requerimientos del actuador: que sea capaz de producir el torque necesario para desplazar la viga de forma correcta teniendo en cuenta la señal de control. En adición, es de gran relevancia resaltar su par de torsión y su bajo consumo necesario a la hora de ejecutar sus respectivas funciones.
- Requerimientos del microcontrolador: debe ser compatible con la pantalla y tener un buen número de entradas/salidas digitales o analógicas para sensores, actuadores y demás dispositivos.
- Luminosidad para visión artificial: debe haber una lámpara led con luz fría que pueda iluminar de manera homogénea el área de trabajo destinado para visión artificial.
- Requerimiento del sensor de visión artificial: es importante que la cámara que se va a usar como elemento de medición para la VA tenga un ángulo de apertura amplio, ya que debe capturar la imagen en un área de trabajo ancha.
- Área de trabajo para VA: para que haya buena medición se debe encerrar el espacio en el que se va a medir con la cámara para que no haya diferencias de luz que afecten la captura de imagen.

5.1.2. Protocolos de comunicación

5.1.2.1. Protocolo de comunicación serie o serial

Este tipo de comunicación envía de forma secuencial un bit de dato por un canal o bus. aunque es más lento que la comunicación en paralelo permite enviar datos a una distancia mayor y usando menos líneas. Es el protocolo más usado hoy en día, seguramente tu computadora o laptop tiene varios puertos USB. Este es un tipo de comunicación serial.

Existen dos tipos de comunicación serial:

- Síncrona o sincrónica.
- Asíncrona o asincrónica

5.1.2.1.1. Comunicación Serial Síncrona

Este tipo de comunicación usa dos líneas, una por la cual se transmiten los datos y otra de reloj que sirve para sincronizar la transferencia de los datos. Esta forma de comunicación trabaja de la siguiente manera, el transmisor pone un bit en la línea de datos y el receptor espera a que se produzca un cambio del pulso de la señal de reloj, esto es que se produzca lo que se llama un flanco de bajada, en ese momento toma la lectura de la línea de datos. Esto lo hace para todos los bits que sean enviados.

5.1.2.1.2. Comunicación Serial Asíncrona

Este tipo de comunicación serial no tiene señal de reloj, por lo cual la sincronización la establece el emisor enviando unos bits especial al receptor para que este conozca el inicio del mensaje y el fin del mensaje. Un parámetro importante en este tipo de comunicación es la velocidad de transmisión, ya que tanto el emisor como el receptor deben tener la misma velocidad. Esta velocidad se conoce como baud rate o baudios por segundo.

Ya conociendo los tipos de comunicación serial voy a explicar los más usados en proyectos con microcontroladores. Si has realizado algún proyecto de electrónica con microcontroladores es posible que ya hayas utilizado alguno de estos protocolos de comunicación.

5.1.2.2. UART (Universal Asynchronous Receiver - Transmitter)

Este protocolo de comunicación es del tipo asíncrono, por lo cual no se requiere una señal de reloj. Usa 3 líneas, una para transmitir datos, una para recibir datos, y otra de tierra. Los pines usados para este tipo de comunicación están rotulados en las tarjetas de desarrollo con las letras RX y TX. Cuando se configura este tipo de comunicación se deben colocar ciertos parámetros iguales en ambos dispositivos

que se van a comunicar, de lo contrario la comunicación fallara. Los parámetros mencionados son los siguientes:

- Velocidad de la transmisión: Esta se expresa en baudios por segundo y es la cantidad de bits que se transmitirán en un segundo.
- Bits de parada: La cantidad de bits que le indican al receptor que la transmisión del paquete ha terminado.
- Bit de paridad: Este bit se usa para determinar si hubo error en la transmisión. Es una forma sencilla de verificación de errores. Este valor puede ser: impar, par, o sin bit de paridad.

5.1.3. Norma ISA 101

El estándar ISA101 HMI pretende marcar una serie de convenciones y normas a la hora del diseño y jerarquía de interfaces HMI utilizados en la automatización industrial de máquinas y procesos.

Los interface HMI en la industria son pantallas, terminales de operador y sistemas SCADA. Los próximos informes técnicos de ISA101 HMI están destinados a ayudar a los usuarios a entender los conceptos básicos de estilo de interfaz hombre-máquina que la norma recomienda. Está dirigido a los responsables de diseñar, implementar, utilizar o administrar aplicaciones HMI.

La norma define los modelos de la terminología y el desarrollo de un HMI y los procesos de trabajo recomendadas para mantener con eficacia a lo largo de su ciclo de vida. La norma pretende proporcionar orientación para diseñar, construir, operar y mantener HMI efectivas que resulten más seguras, más eficaces y más eficiente en el control de un proceso, en todas las condiciones de funcionamiento.

5.1.4. Conexión Universal Serial Bus

El Bus Universal en Serie (BUS) (en inglés: Universal Serial Bus), más conocido por la sigla USB, es un bus de comunicaciones que sigue un estándar que define los cables, conectores y protocolos usados en un bus para conectar, comunicar y proveer de alimentación eléctrica entre computadoras, periféricos y dispositivos electrónicos.

El USB es utilizado como estándar de conexión de periféricos como: teclados, ratones, memorias USB, palancas de mando, escáneres, cámaras digitales, teléfonos móviles, reproductores multimedia, impresoras, impresoras multifunción, sistemas de adquisición de datos, módems, tarjetas de red, tarjetas de sonido, tarjetas sintonizadoras de televisión, grabadoras de DVD externas, discos duros externos y disqueteras externas.

5.2. INGENIERIA DE DETALLE

5.2.1. Matriz de selección del material de las bases

En esta matriz están plasmadas las necesidades vitales del proyecto referentes a la base.

Material 1: Madera MDF

Material 2: Aluminio

Material 3: Acero

Tabla 6 Matriz de selección para el material de las bases. Autoría Propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	+	80	29.09	5	5	3
Maquinabilidad	+	60	21.81	4	3	2
Resistencia	+	50	18.18	3	5	4
Costo	+	85	30.909	5	3	2
TOTAL		275	99.9	17	16	11

En primera instancia se necesita que la estructura sea:

- Liviana.
- Buen soporte.
- Fácil de manejar y accesible.

Se ha escogido la madera MDF ya que cumple con las condiciones estipuladas con anterioridad.

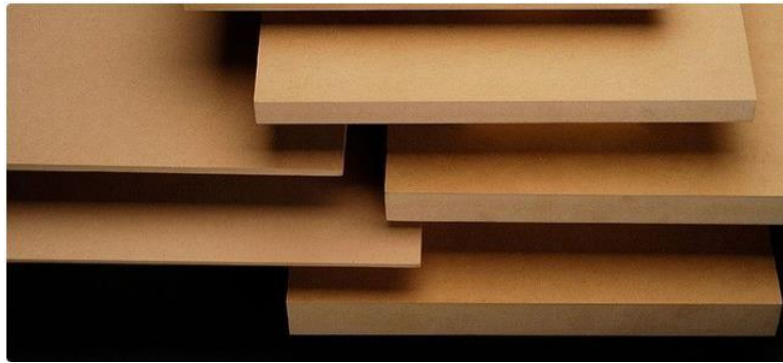


Figura 33 Madera MDF

Fuente: Alejandro. Características de los tableros o madera MDF [en línea]. Disponible en: <https://www.maderasantana.com/caracteristicas-tableros-madera-mdf/>

- El hecho de estar fabricado a partir de fibras de muy reducido tamaño, prácticamente polvo, permite que pueda ser tallada o fresada de manera similar a la madera maciza.
- Una de las grandes ventajas del mdf frente a la madera maciza es su precio, mucho más competitivo.
- No es necesario utilizar herramientas diferentes a la que podemos utilizar para trabajar con madera maciza o contrachapada.
- La superficie de este tipo de madera es ideal para la utilización pinturas y barnices, sin embargo para conseguir un acabado perfecto es preferible utilizar pinturas a base de disolventes en lugar de pinturas al agua. El resultado es el mismo en todas las direcciones al no existir grano.
- Es también un excelente soporte para chapas de madera, con las que se consigue una apariencia de madera de maciza. Se debe por un lado a su uniforme superficie y también al excelente comportamiento que tienen los adhesivos y colas sobre esta.

Tabla 7 Propiedades físico-mecánicas

			Espesores					
Propiedad	Unidad	Tolerancia	5.5	9	12	15	18	25
Densidad	Kg/m ³	± 20	830	760	750	740	730	730
Resistencia a la Tracción	N/mm ²	± 0.1	1.00	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Resistencia a la Flexión	N/mm ²	± 5.0	30	30	30	30	30	30
Módulo de Elasticidad	N/mm ²	± 500	2500	2500	2500	2500	2500	2300
Hinchamiento 24 horas	%		30	14	14	12	12	10
Extracción del tornillo - cara	N	± 150	N/A	N/A	N/A	1250	1250	1250
Extracción del tornillo - canto	N	± 150	N/A	N/A	N/A	1150	1150	1150

Fuente: MASISA MDF. MASISA MDF estándar [en línea]. Disponible en:
<https://www.maderas20.com/wp-content/uploads/2016/09/MDF.pdf>

5.2.2. Matriz de selección del carril o viga y su soporte

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes que competen a la barra o viga del sistema para el correcto funcionamiento.

Material 1: Hierro

Material 2: Aluminio

Material 3: Acero inoxidable

Tabla 8 Matriz de selección para el carril y su soporte. Autoría Propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	-	20	7.326	2	4	3
Maquinabilidad	+	70	25.64	2	4	4
Resistencia	-	18	6.593	4	2	4
Costo	+	80	29.304	4	3	2
Vida útil	+	85	31.135	4	4	5
TOTAL		273	99.998	16	17	18

El material seleccionado en este caso es el acero inoxidable debido a su buena maquinabilidad, resistencia y vida útil.

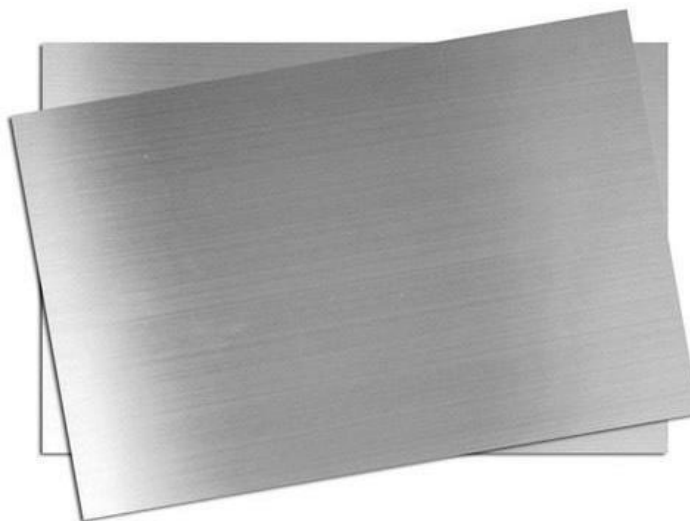


Figura 34 Lámina de Acero Inoxidable

Fuente: Todo de inoxidable. Lámina de Acero Inoxidable C-11 T-430 P3 [en línea]. Disponible en: <https://tododeinoxidable.com.mx/productos/placa-y-lamina/lamina/lamina-c-11-t-430-p3/>

- Alta resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia mecánica.
- Apariencia y propiedades higiénicas.

- Resistencia a las altas y bajas temperaturas.
- Buenas propiedades de soldabilidad, mecanizado, corte, doblado y plegado.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Reciclable.
- Es un excelente conductor de calor

5.2.3. Matriz de selección del sensor de posición

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes para el sensor que medirá la distancia de la esfera, teniendo en cuenta que, la distancia máxima que podrá ser desplazada la esfera en la viga es de 43 cm.

Sensor 1: Sensor ultrasónico US-016

Sensor 2: VI53I0x V2

Sensor 3: TF mini Lidar Plus

Tabla 9 Matriz de selección para el sensor de posición. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Voltaje de funcionamiento	-	20	5.063	5	5	5
Rango de medición	+	60	15.189	5	2	5
Resolución	+	80	20.25	5	3	3
Precisión	+	80	20.25	3	4	5
Repetibilidad	+	85	21.518	3	4	5
Costo	+	70	17.72	5	4	2
TOTAL		395	99.99	26	22	25

Realizado el procedimiento anterior se optó por el sensor ultrasónico US-016, debido a su buena resolución y su rango de trabajo.



Figura 35 Sensor ultrasonido HC-SR04

Fuente: Naylamp mecatronics. Sensor ultrasonido analógico US-016 [en línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/224-sensor-ultrasonido-analogico-us-016.html>

Los sensores ultrasónicos ofrecen ventajas al detectar objetos claros, nivel de líquido o superficies altamente reflectantes o metálicas. Los sensores ultrasónicos también funcionan bien en ambientes húmedos donde un haz óptico puede refractar las gotitas de agua.

5.2.4. Matriz de selección del servomotor

Para la selección del servomotor el objetivo principal que debe cumplir (sin menospreciar los demás no menos importantes) es que sea capaz de producir el torque necesario para desplazar la viga de forma correcta teniendo en cuenta la señal de control. En adición, es de gran relevancia resaltar su par de torsión y su bajo consumo necesario a la hora de ejecutar sus respectivas funciones.

Servo1: Smart Servo A1-16

Servo 2: Servomotor SR-1501MG

Servo 3: Servomotor Fs5106m Fee-tech

Tabla 10 Matriz de selección para el servomotor. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Servo 1	Servo 2	Servo 3
Par de torsión	+	85	25.373	5	4	3
Corriente de reposo	-	20	5.97	5	5	5
Corriente de funcionamiento	-	30	8.955	5	5	4
Tensión de funcionamiento	-	15	4.4776	4	5	5
Rendimiento	+	80	23.88	5	3	3
Control	+	90	26.86	5	3	3
Costo	-	15	4.4776	3	4	5
TOTAL		335	99.998	32	29	28

Para la selección de este artículo no importa el costo, ya que, se necesita que sea preciso en el giro, que tenga un buen par de torsión, que tenga un rendimiento eficiente y lo más importante que el control que se le efectué ofrezca grandes ventajas en el sistema.

Por lo tanto, el servomotor seleccionado es el Smart Servo A1-16.



Figura 36 XYZROBOT SMART SERVO A1-16

Fuente: Vistrónica. XYZROBOT SMART SERVO A1-16 25KG.CM DYNAMIXEL [en línea].
 Disponible en: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/servomotores/xyzrobot-smart-servo-a1-16-25kg-cm-dynamixel-detail.html>

A diferencia de los servos comunes de la manía de RC, estos servos son capaces de girar 360° en rotación continua mientras que todavía ofrece el control de posición sobre un alcance efectivo de 330°. Cuentan con una interfaz serial TTL que se utiliza para configurar y controlar el servo y obtener información acerca de la posición, velocidad y temperatura. Múltiples servos pueden ser conectados en cadena en el mismo bus serie. Cada servo también cuenta con un LED de cuatro colores que sirve como un indicador visual de error por defecto, por lo que es posible determinar rápidamente si uno o todos los servos de la cadena están experimentando un problema. Por otra parte, este LED se puede controlar de forma manual a través de la interfaz serie.

- Tensión de funcionamiento: 12V
- Stall torque: 25 Kg-cm (máx.)
- Velocidad sin carga: 70 +/- 10 rpm, 60 +/- 2 g
- Dimensiones: 50 x W x D 32 mm 40L
- Resolución: 0.323 "
- Relación de reducción: 254
- Corriente de funcionamiento: 500mA
- Corriente en reposo: 300 mA (máx.)
- Temperatura de funcionamiento: 0-40 ° C

5.2.5. Matriz de selección pantalla HMI

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes que competen a la pantalla donde se verá reflejada la interface humano-maquina.

Pantalla 1: Pantalla Touch Serial 5 pulgadas

Pantalla 2: Pantalla HMI Inteligente NEXTION 10.1 pulgadas

Pantalla 3: Pantalla Hmi Delta 10 Pulgadas Dop-b10e615

Tabla 11 Matriz de selección de la pantalla HMI. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Pantalla 1	Pantalla 2	Pantalla 3
Tamaño display	+	85	25.757	3	5	5
Alimentación	-	15	4.545	4	4	3
Capacidad de comunicación	+	95	28.787	4	5	5
Programa de desarrollo de interface	+	85	25.757	5	5	4
Costo	+	50	15.1515	5	4	3
TOTAL		330	99.99	21	23	20

La pantalla seleccionada es la pantalla HMI Inteligente NEXTION 10.1 pulgadas, debido a, su buen tamaño, el cual permitirá una mejor visualización en la retroalimentación con el operario, también tiene una buena resolución, además la comunicación con el microcontrolador es de forma fácil y otra característica importante de esta pantalla es su fácil manejo del entorno de desarrollo de la interface.

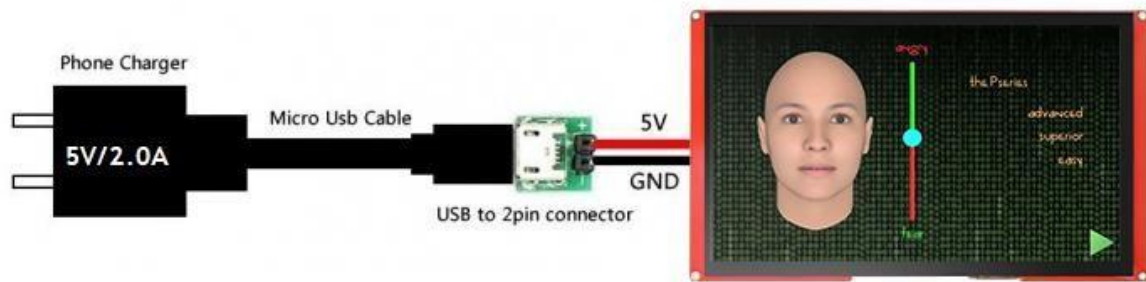


Figura 37 Conexión pantalla Nextion NX1060P101-011R-I

Fuente: NEXTION. NX1060P101-011R-I (Pantalla táctil resistiva IPS de 10,1 pulgadas sin carcasa) [en línea]. Disponible en: <https://nextion.tech/datasheets/NX1060P101-011R-I/>

Nextion es una solución de interfaz hombre-máquina (HMI) que combina un procesador integrado y una pantalla táctil de memoria con el software Nextion Editor para el desarrollo de proyectos HMI GUI. Con el software NEXTION Editor, puede desarrollar rápidamente la GUI de HMI arrastrando y soltando componentes (gráficos, texto, botón, control deslizante, etc.) e instrucciones basadas en texto ASCII para codificar cómo interactúan los componentes en el lado de la pantalla. La pantalla Nextion HMI se conecta a la MCU periférica a través de TTL Serial (5V, TX, RX, GND) para proporcionar notificaciones de eventos en las que la MCU periférica puede actuar, la MCU periférica puede actualizar fácilmente el progreso y el estado a la pantalla Nextion utilizando instrucciones simples basadas en texto ASCII.

5.2.6. Matriz de selección del material para soporte del actuador

Para la selección del material para soporte del actuador, principalmente se tiene en cuenta que este tenga buena maquinabilidad y resistencia.

Material 1: PLA

Material 2: Madera MDF

Material 3: Acero inoxidable

Tabla 12 Matriz de selección del material para soporte del actuador. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	-	20	9.0909	5	3	3
Maquinabilidad	+	70	31.8181	5	4	3
Resistencia	+	60	27.2727	4	4	5
Costo	-	20	9.0909	3	4	3
Vida útil	+	50	22.7272	3	5	5
TOTAL		220	99.999	20	20	19

Observando la tabla 11 se puede evidenciar que el total para el material 1 y material 2 son el mismo, por lo tanto, para la selección de este se tuvo en cuenta la forma del actuador para su debida sujeción. Por consiguiente, con los nuevos avances tecnológicos se optó por el material PLA, ya que con este se puede realizar figuras a partir de un diseño que se adaptara de mejor manera a la estructura del actuador.



Figura 38 Filamento PLA

Fuente: ABAX. Filamento PLA [en línea]. Disponible en:
<https://abax3dtech.com/2020/10/19/filamento-pla-conoces-su-historia-y-caracteristicas/>

- Inodoro, permanente, claro y brillante.

- Altamente resistente ante la humedad y la grasa.
- Similar al polietileno en cuanto a desarrollar barreras para sabores y olores.
- Suficientemente extensible y elástico.
- Su nivel de inflamabilidad es muy bajo lo que lo hace estable a la luz UV.
- Aunque es flexible el PLA 3D puede formularse a fin de que sea rígido.
- Puede copolimerizarse con otros materiales.
- Su proceso de fabricación puede variarse a fin de adoptar características mecánicas.

5.2.7. Matriz de selección de dispositivo microcontrolador

Para el microcontrolador se tendrá en cuenta las siguientes características:

- Comunicación con la pantalla HMI
- Número de entradas/salidas digitales o analógicas para sensores, actuadores y demás dispositivos.

Tabla 13 Matriz de selección para microcontrolador. Autoría propia

Criterios	Arduino mega	Arduino uno	Raspberry Pi
Microcontrolador	ATmega2560	ATmega328	Broadcom BCM2711
Voltaje de funcionamiento	5 V	5 V	5 V
Velocidad de reloj	16 MHz	16 MHz	1,5 GHz
Corriente DC por cada pin I/O	40 mA	40 mA	130 mA
SRAM	2 KB	2 KB (ATmega328)	96 KB (2bancos: 64KB Y 32KB)
EEPROM	1 KB	1 KB (ATmega328)	-
Corriente DC en el pin de 3.3 V	50 mA	50 mA	16 mA
Memoria Flash	256 KB (8KB usados por el bootloader)	32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son utilizados por el bootloader	entre 256MB y 8GB
Número de pines	Pines de E/S digital: 54 (de los cuales 15 son salida PWM). Pines de entrada analógica: 16.	Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (De las cuales 6 son salidas PWM) Pines de Entradas Analógicas: 6.	GPIO de 40 pines

El elemento seleccionado es el Arduino mega 2560, el cual, es una plataforma de hardware y software de código abierto basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing.

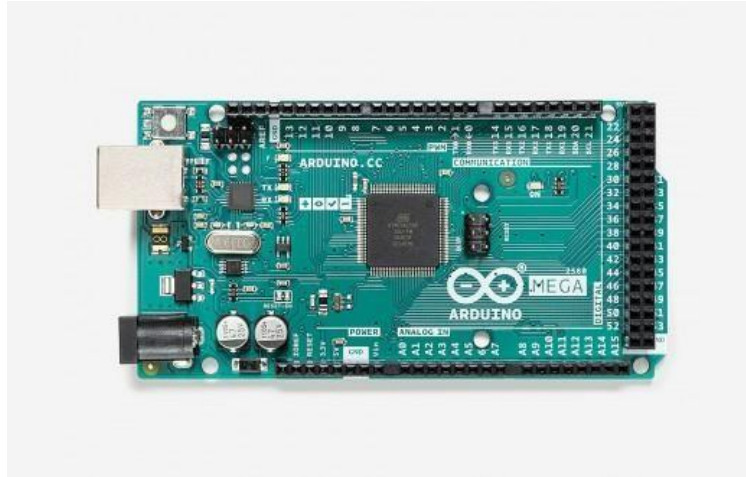


Figura 39 ARDUINO MEGA 2560

Fuente: ARDUINO. ARDUINO MEGA 2560 REV3 [en línea]. Disponible en:
<https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Es probablemente el microcontrolador más capaz de la familia Arduino. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa.

5.2.8. Matriz de selección de las varillas del sistema ball and beam forma manual

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes que compete a la barra del sistema ball and beam de forma manual para el correcto funcionamiento.

Material 1: Hierro

Material 2: Aluminio

Material 3: Acero inoxidable

Tabla 14 Matriz de selección para la varilla. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	-	20	7.326	2	5	3
Maquinabilidad	+	70	25.64	2	4	4
Resistencia	-	18	6.593	4	3	5
Costo	+	80	29.304	5	2	3
Vida útil	+	85	31.135	4	2	4
TOTAL		273	99.998	17	16	19

El material seleccionado para las varillas es acero debido a su fácil maquinabilidad y su vida útil.



Figura 40 Varilla de acero inoxidable

Fuente: CBM. Eje de acero inoxidable [en línea]. Disponible en: <http://www.centralbroncesymetales.com/Acero%20plata.html>

- Tracción: 730 – 770 MPa
- Fluencia: 580 – 610 MPa
- Elongación: 17 – 19%
- Dureza en estado de recocido: 180 – 285 Brinell (HB)
- Dureza obtenido en tratamiento de temple: Hasta 65 HRC

5.2.9. Matriz de selección del material de las bases del sistema Ball and beam forma manual y el objeto de medición del carro

Para la selección del material para el soporte de las varillas, principalmente se tiene en cuenta que este tenga buena maquinabilidad.

Material 1: PLA

Material 2: Madera MDF

Material 3: Acero inoxidable

Tabla 15 Matriz de selección del material de las bases del sistema Ball and beam forma manual

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	-	20	9.0909	5	3	3
Maquinabilidad	+	70	31.8181	5	4	3
Resistencia	+	60	27.2727	4	4	5
Costo	-	20	9.0909	3	4	3
Vida útil	+	50	22.7272	3	5	5
TOTAL		220	99.999	20	20	19

Observando la tabla 15 se puede evidenciar que el total para el material 1 y material 2 son el mismo, por lo tanto, para la selección se tuvo en cuenta la maquinabilidad y estética del material. Por consiguiente, se optó por el material 1 (PLA).



Figura 41 Material PLA

Fuente: ABAX. Filamento PLA [en línea]. Disponible en:
<https://abax3dtech.com/2020/10/19/filamento-pla-conoces-su-historia-y-caracteristicas/>

- Inodoro, permanente, claro y brillante.
- Altamente resistente ante la humedad y la grasa.
- Similar al polietileno en cuanto a desarrollar barreras para sabores y olores.
- Suficientemente extensible y elástico.
- Su nivel de inflamabilidad es muy bajo lo que lo hace estable a la luz UV.
- Aunque es flexible el **PLA 3D** puede formularse a fin de que sea rígido.
- Puede copolimerizarse con otros materiales.
- Su proceso de fabricación puede variarse a fin de adoptar características mecánicas.

5.2.10. Matriz de selección del soporte y carcasas de sensores

Para la selección del material para recubrir algunos componentes de la planta, principalmente se tiene en cuenta que este tenga buena maquinabilidad.

Material 1: PLA

Material 2: Madera MDF

Material 3: Acero inoxidable

Tabla 16 Matriz de selección del soporte y carcasas de sensores

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Material 1	Material 2	Material 3
Peso	-	20	9.0909	5	3	3
Maquinabilidad	+	70	31.8181	5	4	3
Resistencia	+	60	27.2727	4	4	5
Costo	-	20	9.0909	3	4	3
Vida útil	+	50	22.7272	3	5	5
TOTAL		220	99.999	20	20	19

Observando la tabla 16 se puede evidenciar que el total para el material 1 y material 2 son el mismo, por lo tanto, para la selección del material se tuvo en cuenta su maquinabilidad, debido a esto y los nuevos avances tecnológicos se optó por el material PLA, ya que tiene buenas características de funcionalidad.



Figura 42 Filamento PLA para impresora 3D

Fuente: ABAX. Filamento PLA [en línea]. Disponible en:
<https://abax3dtech.com/2020/10/19/filamento-pla-conoces-su-historia-y-caracteristicas/>

- Inodoro, permanente, claro y brillante.
- Altamente resistente ante la humedad y la grasa.

- Similar al polietileno en cuanto a desarrollar barreras para sabores y olores.
- Suficientemente extensible y elástico.
- Su nivel de inflamabilidad es muy bajo lo que lo hace estable a la luz UV.
- Aunque es flexible el PLA 3D puede formularse a fin de que sea rígido.
- Puede copolimerizarse con otros materiales.
- Su proceso de fabricación puede variarse a fin de adoptar características mecánicas.

5.2.11. Matriz de selección del sensor de distancia manual

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes para el sensor que medirá la distancia de la esfera, teniendo en cuenta que, la distancia máxima que podrá ser desplazada la esfera en la viga es de 43 cm.

Sensor 1: Sensor ultrasónico HC-SR04

Sensor 2: VI53I0x V2

Sensor 3: TF mini Lidar Plus

Tabla 17 Matriz de selección para el sensor de posición. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Voltaje de funcionamiento	-	20	5.063	5	5	5
Rango de medición	+	60	15.189	4	2	5
Resolución	+	80	20.25	5	3	3
Precisión	+	80	20.25	3	4	5
Repetibilidad	+	85	21.518	3	4	5
Costo	+	70	17.72	5	4	1
TOTAL		395	99.99	25	22	24

Realizado el procedimiento anterior se optó por el sensor ultrasónico HC-SR04, debido a su buena resolución y su rango de trabajo.



Figura 43 Sensor ultrasonido HC-SR04

Fuente: Naylamp mecatronics. Sensor ultrasonido HC-SR04 [en línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>

Los sensores ultrasónicos ofrecen ventajas al detectar objetos claros, nivel de líquido o superficies altamente reflectantes o metálicas. Los sensores ultrasónicos también funcionan bien en ambientes húmedos donde un haz óptico puede refractar las gotitas de agua.

5.2.12. Matriz de selección de la cámara

En esta matriz se verán contempladas algunas de las características más importantes para la selección de la cámara que servirá como elemento de medición para VA, se debe tener en cuenta como principal característica el ángulo de visión.

Sensor 1: Cámara de celular

Sensor 2: Cámara Web 1080p Para Pc

Sensor 3: Cámara compacta W800

Tabla 18 Matriz de selección de la cámara. Autoría propia

				Ponderación de 0 a 5, 0 el peor y 5 el mejor		
Criterios	Objetivo	Importancia (0 - 100)	Porcentaje %	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3
Resolución	-	80	20.253	5	5	5
Ángulo de visión	+	100	25.316	5	4	5
Tipo Resolución	+	80	20.253	5	5	5
Costo	+	50	12.658	2	5	3
Interfaz (USB preferiblemente)	+	85	21.518	5	5	3
TOTAL		395	99.99	22	24	21

Realizada la matriz se puede observar que la mejor opción de cámara para las exigencias de la planta es la cámara 2, cabe recalcar que la cámara 1 también fuera sido una buena opción, pero debido a su alto costo no fue factible para la selección.



Figura 44 Cámara web full HD

Fuente: Mercado libre. Cámara Web 1080p Para Pc Laptop USB Web Cam Con Micrófono [en línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-590703708-camara-web-1080p-para-pc-laptop-usb-web-cam-con-microfono_JM?searchVariation=66472941282#searchVariation=66472941282&position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=163e7a5d-7e3a-4ae0-9203-2baf362af4f

- Cámara Web Full HD 1080P
- Alta definición Full HD 1080P a 30 fps.
- Micrófono integrado con reducción de ruido.
- Conecta al puerto USB de tu Mac o PC y disfruta, no requiere controladores e instalación rápida en monitores.

CAPITULO 3

6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA BALL AND BEAM

6.1. CAD DEL SISTEMA BALL AND BEAM

En la figura 45 se muestra el diseño del CAD ([anexo 12](#)) y en las figuras 46 y 47 las acotaciones en cm.

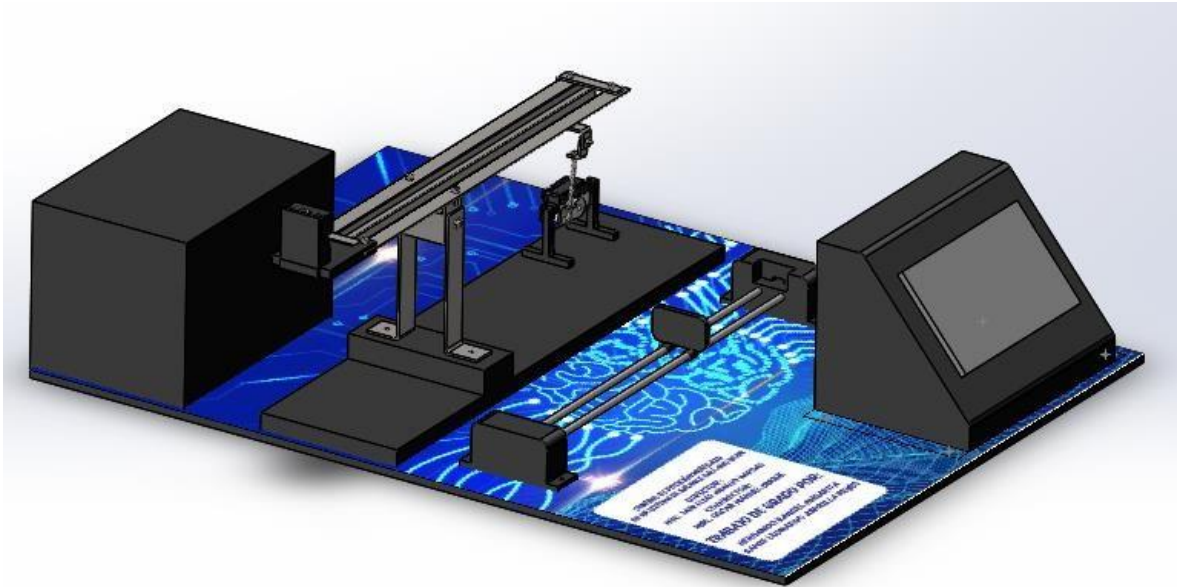


Figura 45 Diseño CAD del sistema Ball and beam. Autoría propia

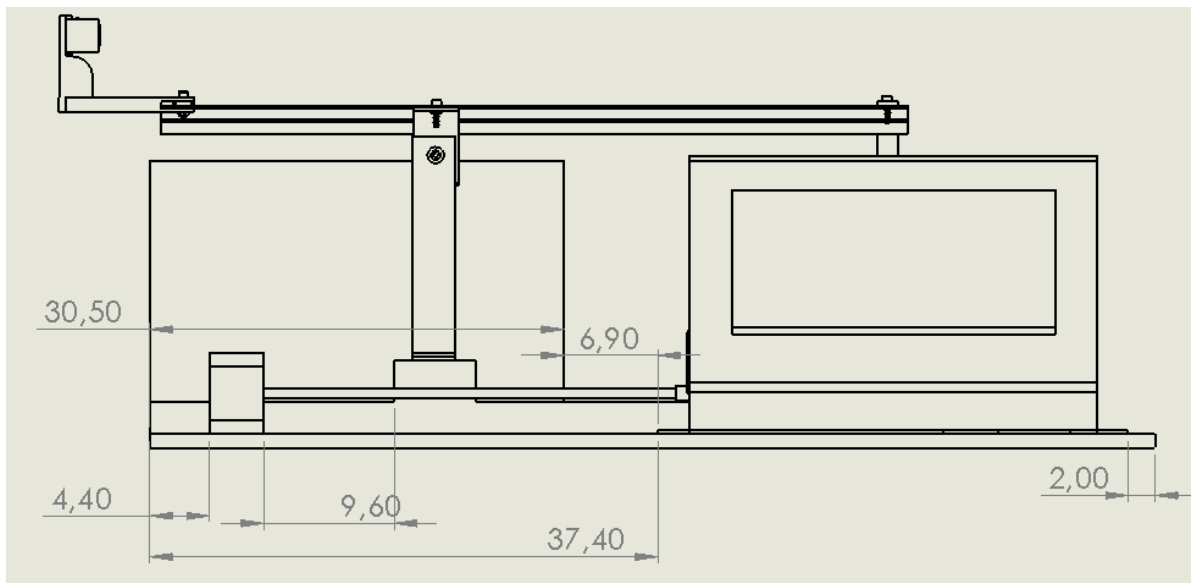


Figura 46 Medidas de separación de cada componente por la vista frontal. Autoría propia

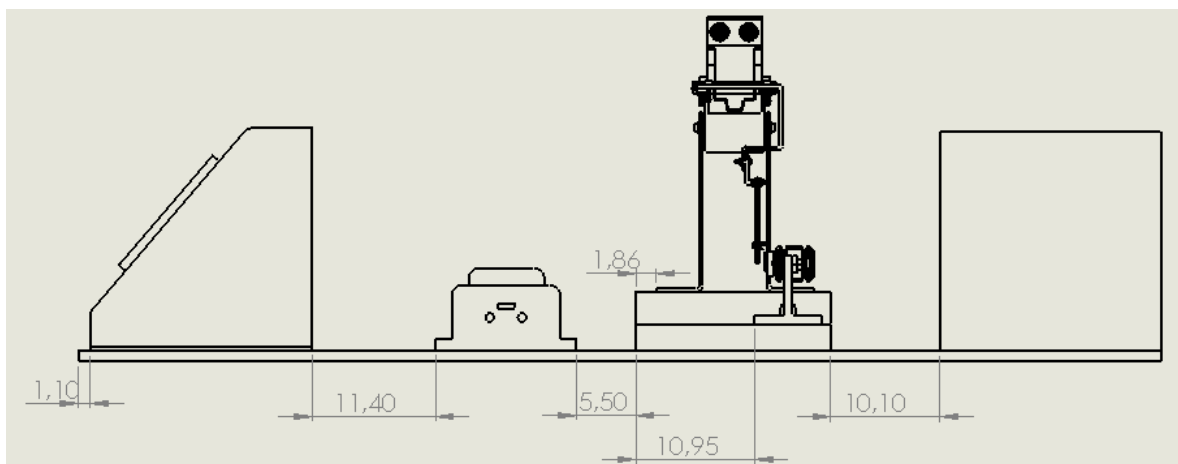


Figura 47 Medidas de separación de cada componente por la vista lateral derecha Autoría propia

6.2. CIRCUITOS ELECTRONICO

Se realizo el diseño de la placa PCB en el software Proteus como se observa en la figura 48:

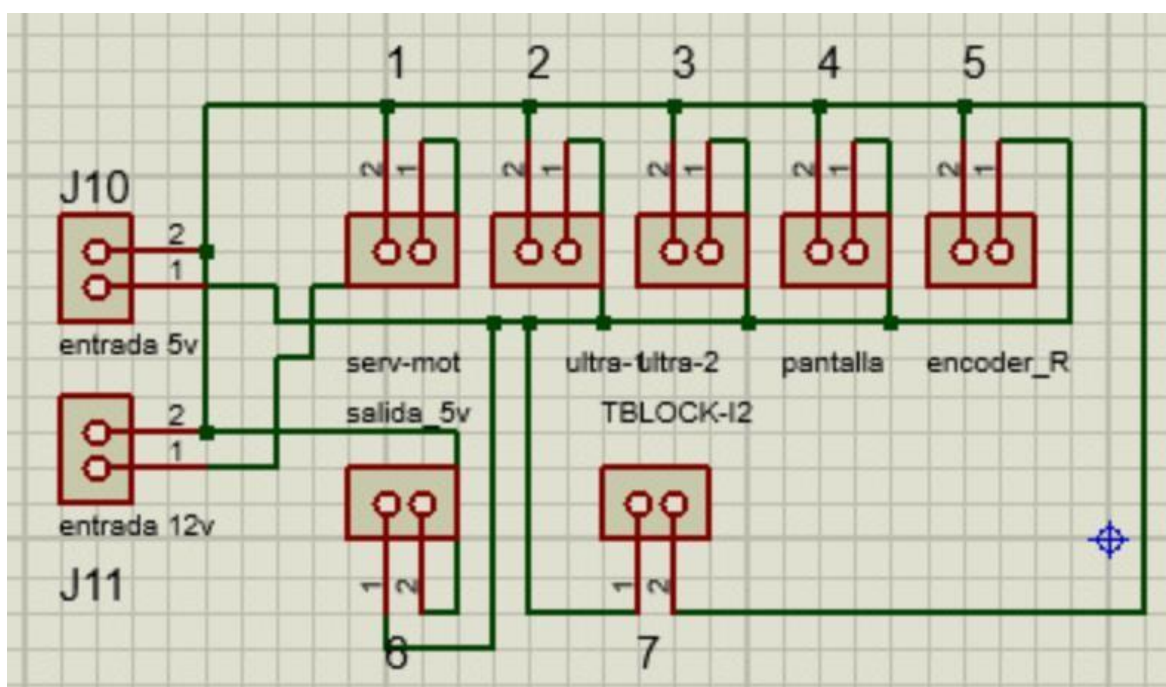


Figura 48 Circuito electrónico en Proteus. Autoría propia

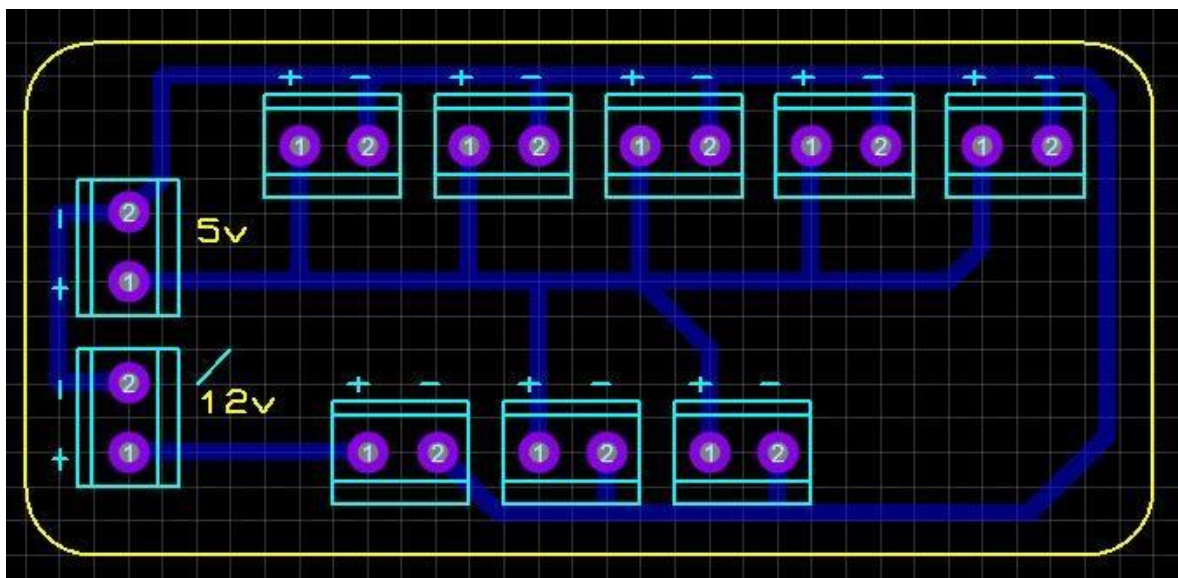


Figura 49 Diseño placa PCB. Autoría propia

En la figura 50 se observa el circuito electrónico del módulo relé

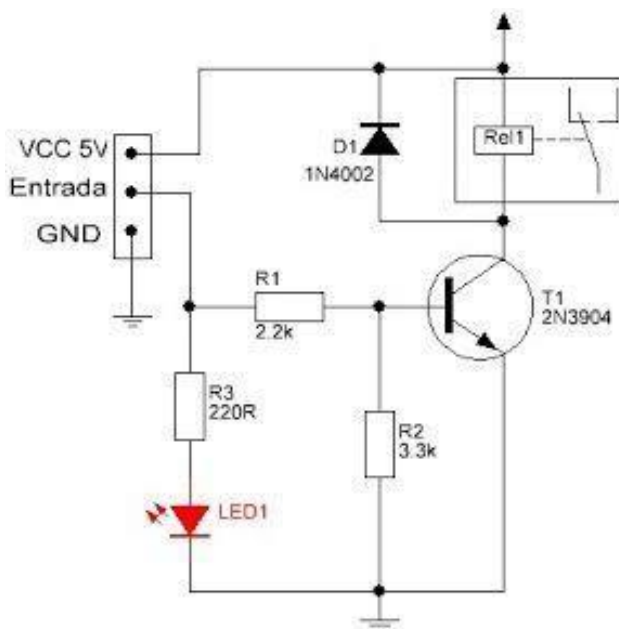


Figura 50 Circuito de modulo relé.

Fuente: Pinterest. Módulo de relé [en línea]. Disponible en: <https://ar.pinterest.com/pin/245375879682672484/>

6.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA BALL AND BEAM

- Inicialmente se corta una lámina de MDF de 1 cm de espesor con un ancho de 76 cm y un largo de 100 cm, la cual es usada como soporte para cada uno de los componentes.



Figura 51 Tabla MDF. Autoría propia

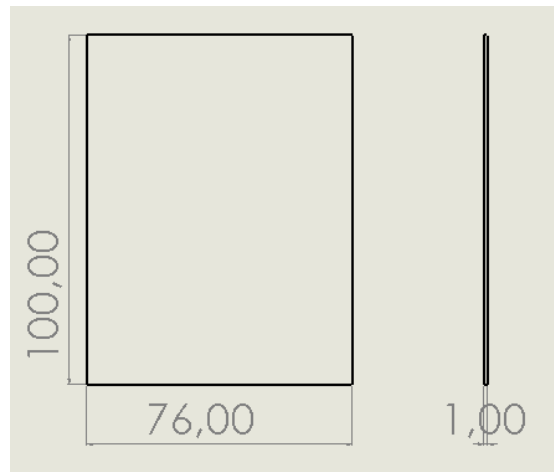


Figura 52 Medidas Tabla MDF. Autoría propia

- Para la base del sistema ball and beam se corta una lámina de MDF con un ancho de 16 cm por un largo de 60 cm, y se lamina con papel adhesivo color negro, luego de esto se colocó un bloque de MDF para darle altitud al carril del sistema.

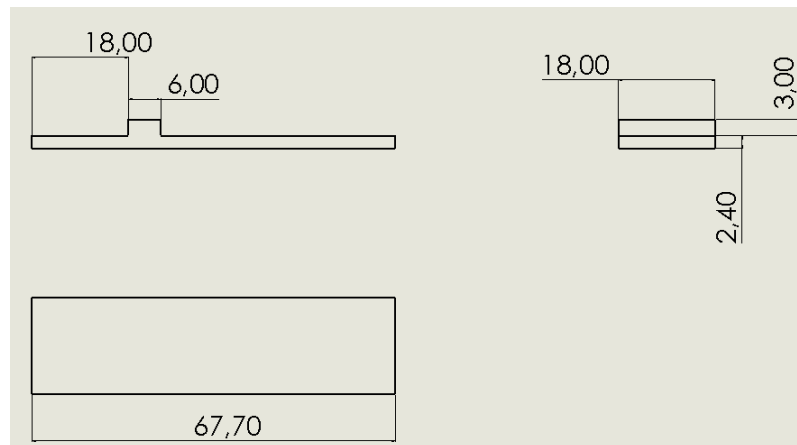


Figura 53 Medidas de la base para soporte ball and beam. Autoría propia

- Se dobla dos láminas de acero inoxidable las cuales sirven como soporte para el carril, después se perforaron 2 agujeros para cada una, uno para la parte superior, el cual alojara el tornillo que sirve de eje para el carril y otro en la parte inferior que sirve de sujeción a la base.



Figura 54 L para soporte del carril. Autoría propia

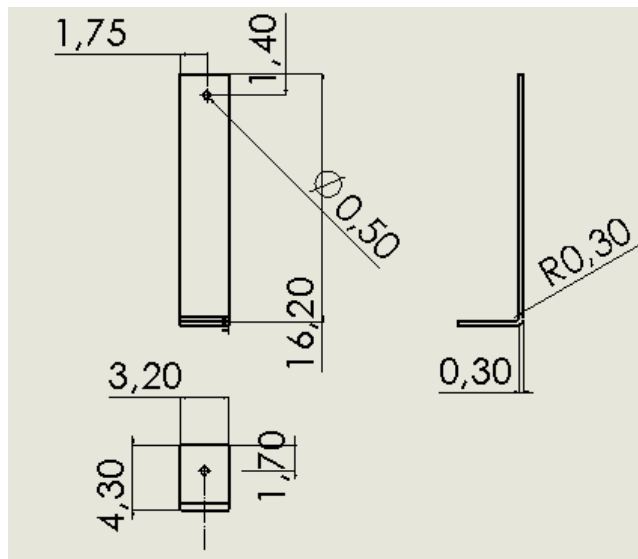


Figura 55 Medidas de Soporte para carril. Autoría propia

- Se hace una pieza en acero inoxidable para la unión de las L y el carril, a la cual se le hizo 4 perforaciones, soldándole a cada una de estas una tuerca para el agarre del tornillo.

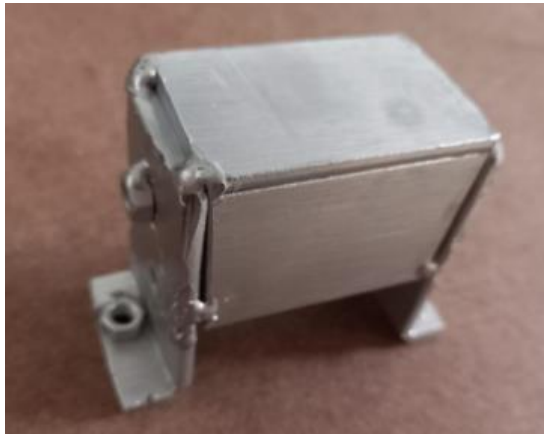


Figura 56 Unión de las L y carril. Autoría propia

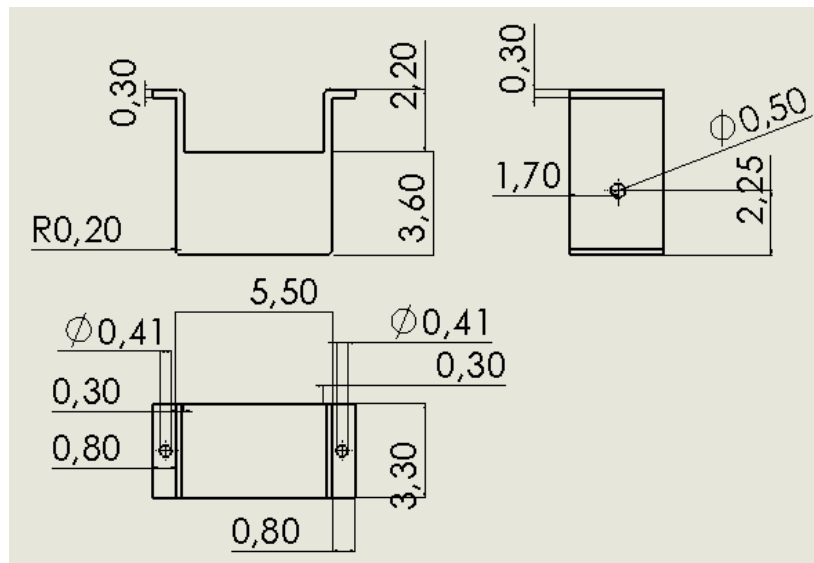


Figura 57 Medidas conector de las L y carril. Autoría propia

- Se hace la compra de una rodachina colgante.



Figura 58 Rodachina colgante. Autoría propia

- Se realiza la impresión 3D de la bandera, la cual será el objeto a medir.



Figura 59 Bandera a medir. Autoría propia

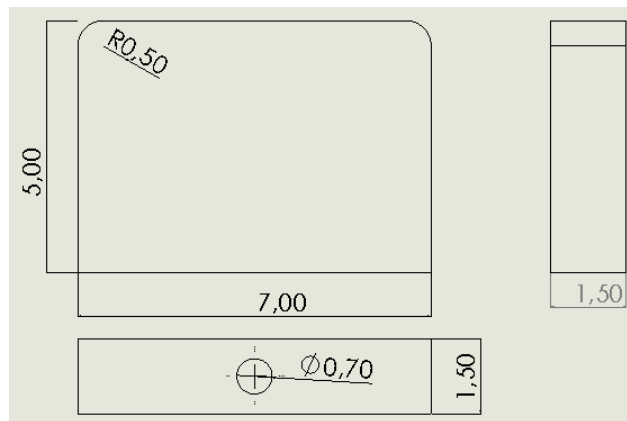


Figura 60 Medidas bandera a medir. Autoría propia

- **Ensamble 1:** Se hace el ensamble de la bandera y rodachina colgante, la cual se llamó “carro”.



Figura 61 Carro a medir. Autoría propia

- Se hace el perfil o carril en acero inoxidable con las debidas especificaciones establecidas en el CAD, para el desplazamiento del carro o la bola.



Figura 62 Perfil de acero inoxidable. Autoría propia

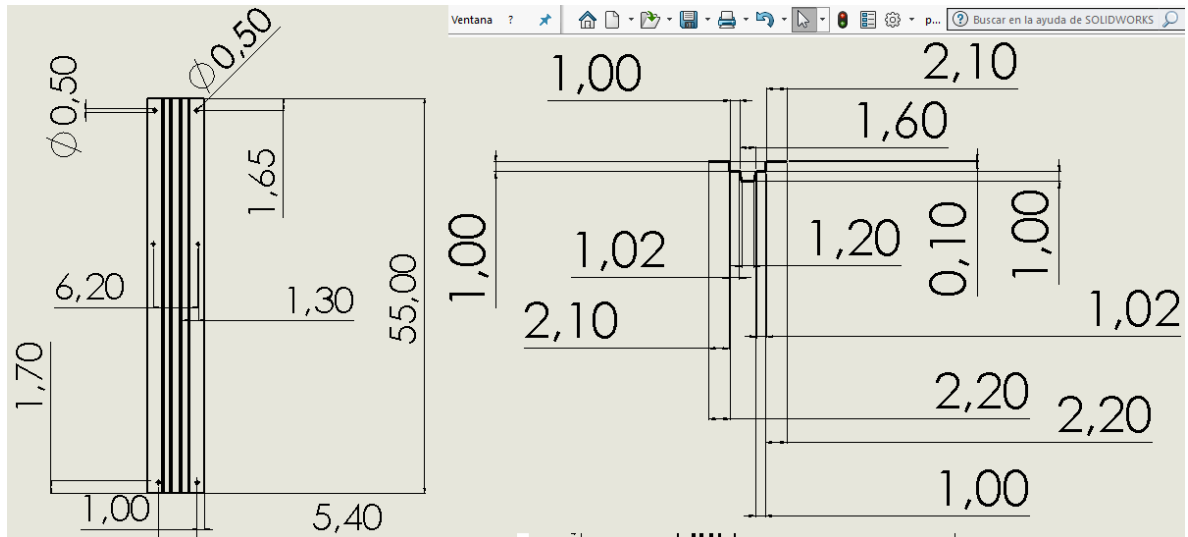


Figura 63 Medidas perfil de acero inoxidable. Autoría propia

- Se cortan dos laminas en acero inoxidable las cuales le dan rigidez al riel, una de estas se utiliza para el soporte del sensor y la otra para la transmisión del movimiento.



Figura 64 Lamina para movimiento. Autoría propia

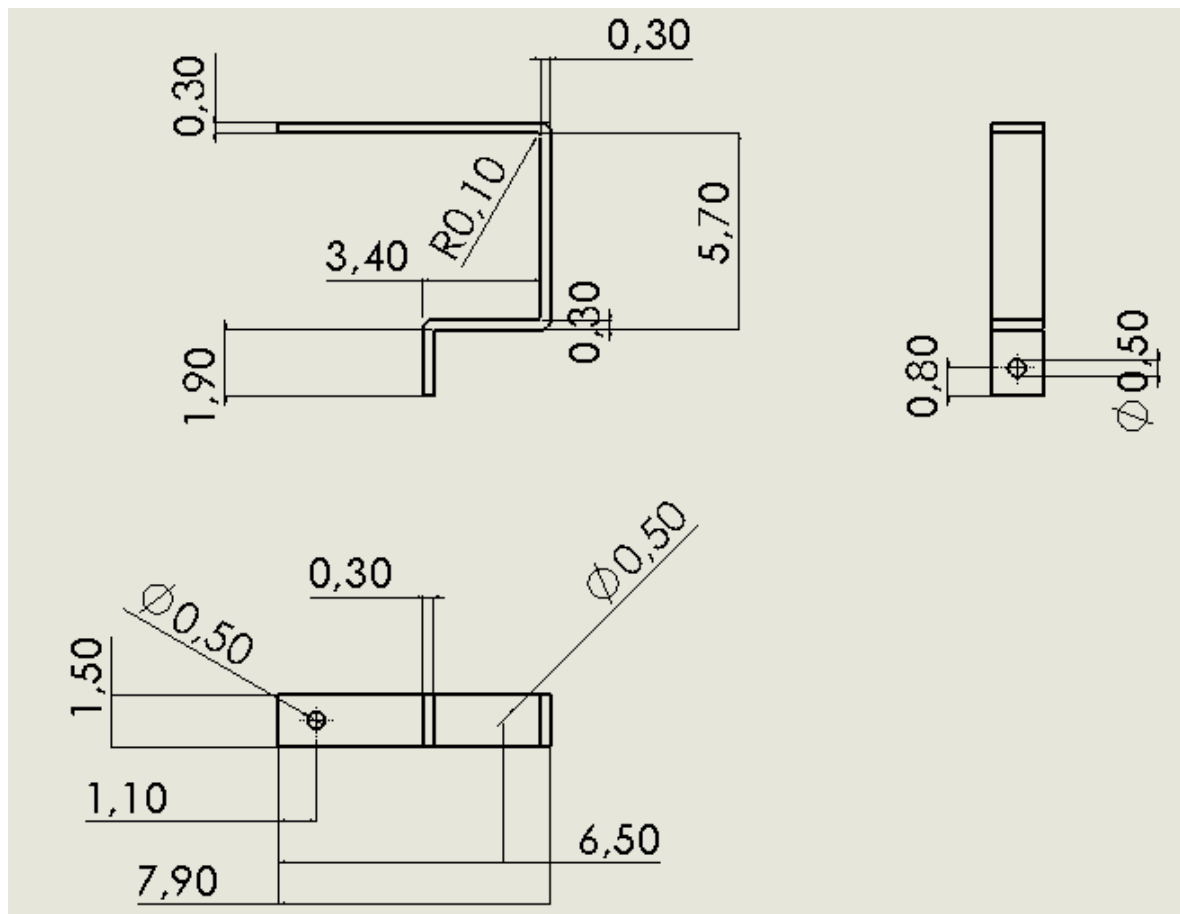


Figura 65 Medidas lamina para movimiento. Autoría propia



Figura 66 Lamina para rigidez del riel. Autoría propia

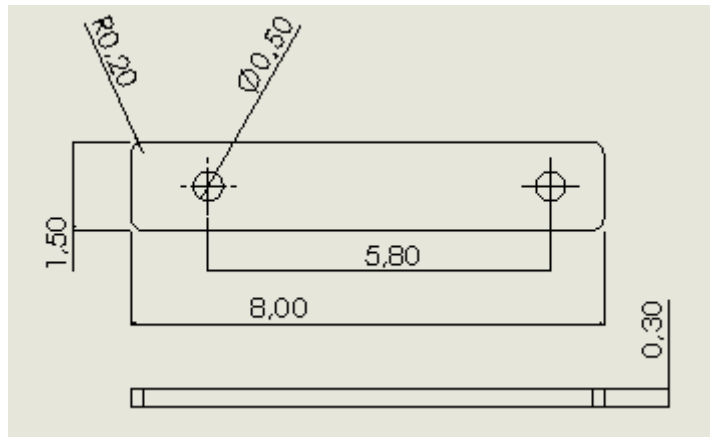


Figura 67 Medidas lamina para rigidez del riel. Autoría propia

- Se realiza la impresión 3D del soporte y la carcasa del sensor ultrasónico, el cual va a medir la posición del carro.

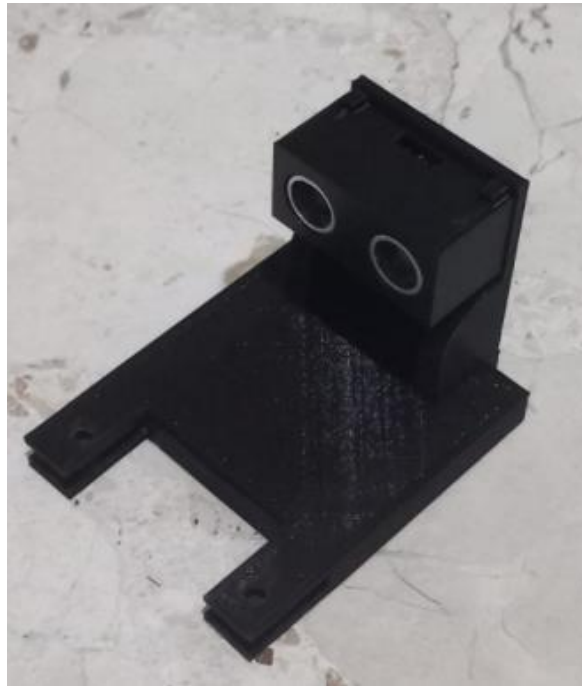


Figura 68 Soporte y carcasa del sensor de posición. Autoría propia

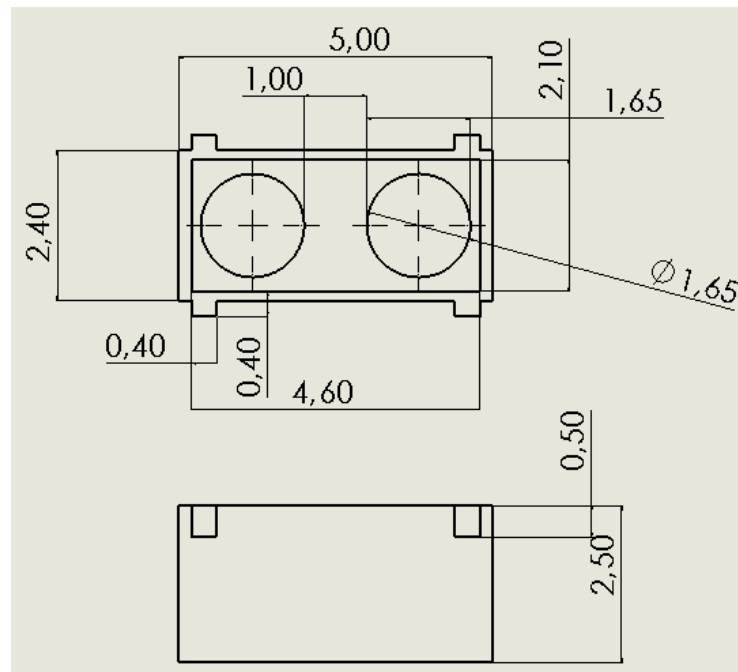


Figura 69 Medidas de la carcasa de sensor de posición. Autoría propia

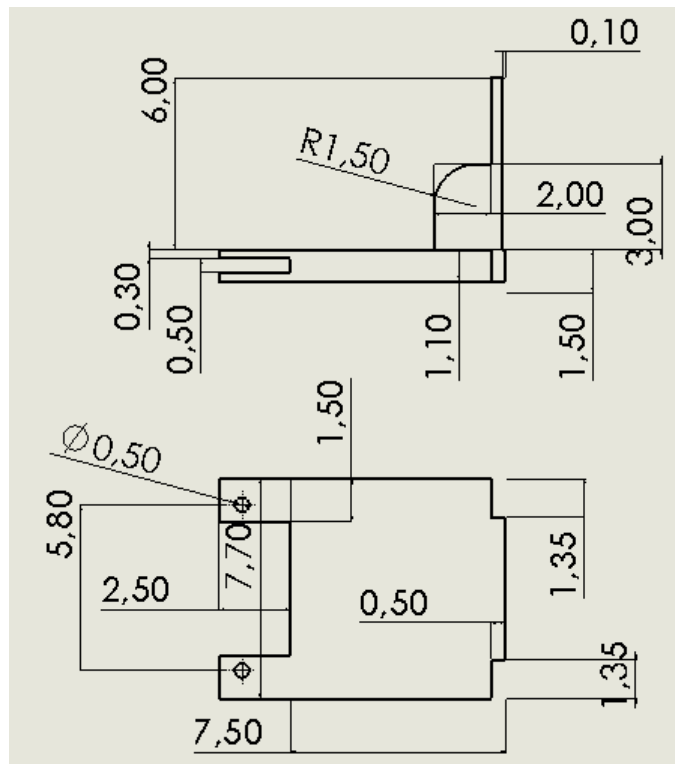


Figura 70 Medidas soporte del sensor de posición. Autoría propia

- Se ensambla una pieza en acero inoxidable que tendrá la función de transmitir el movimiento que realiza el eje del servomotor con el carril. (Se debe tener en cuenta que el tornillo que tiene la pieza es de 5 mm de diámetro y 7.5 cm de largo, además es usado para graduar la altura del riel con el servomotor).



Figura 71 Pieza de transmisión para movimiento. Autoría propia

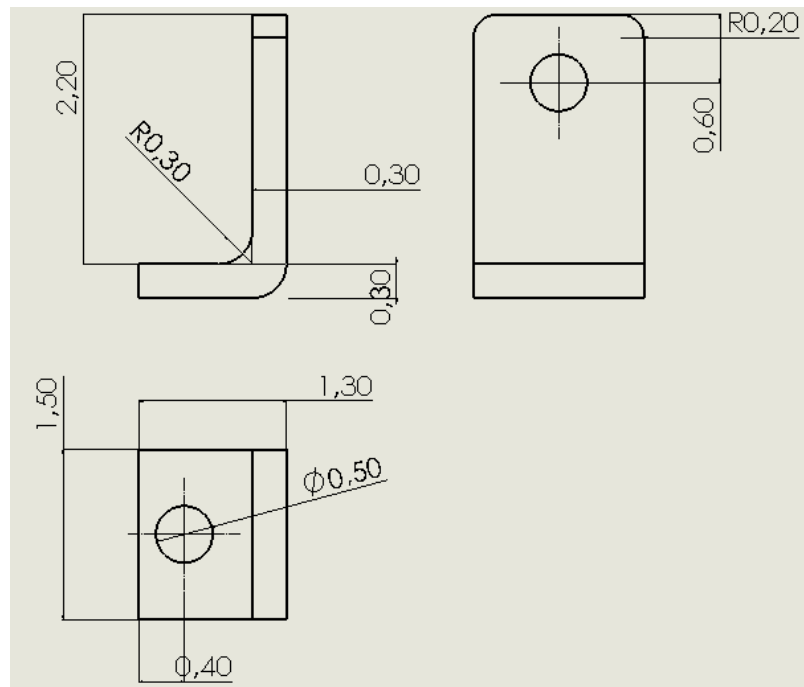


Figura 72 Medidas conector parte inferior tornillo. Autoría propia

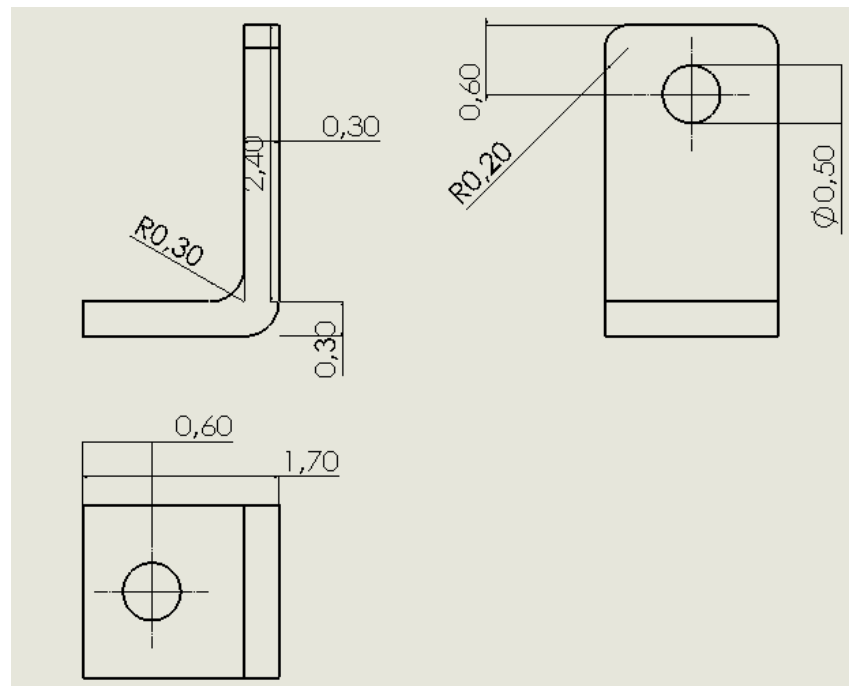


Figura 73 Medidas conector parte superior tornillo. Autoría propia

- **Ensamble 2:** Se hace el ensamble de las piezas de transmisión de movimiento, el perfil y la pieza de unión de las L.



Figura 74 Ensamble de las piezas de transmisión de movimiento, el perfil y la pieza de unión de las L. Autoría propia

- Se realiza la impresión 3D de dos piezas en forma de T que sirven como soporte para el actuador (servomotor).



Figura 75 Piezas soporte actuador. Autoría propia

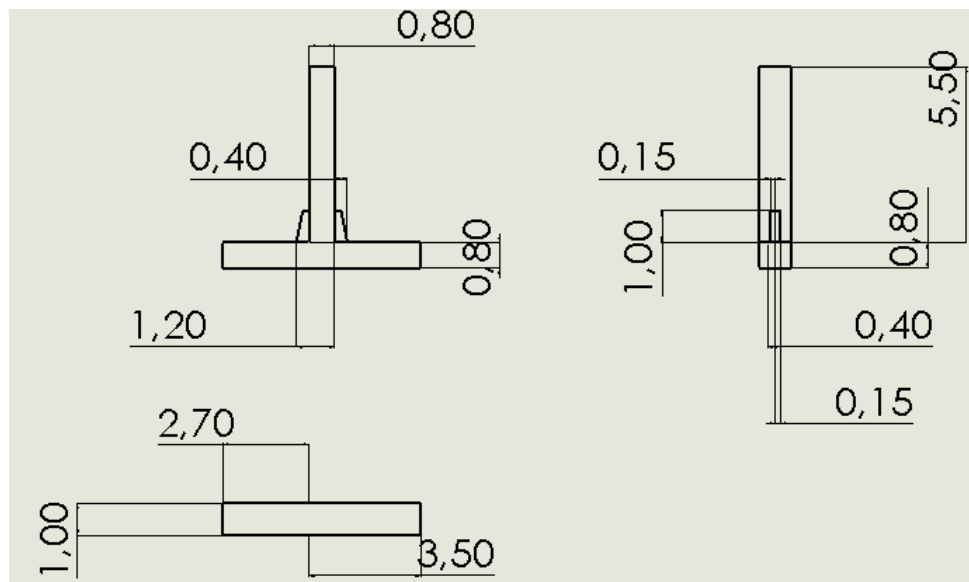


Figura 76 Medidas piezas en T para soporte del servomotor. Autoría propia

- Se realiza la impresión 3D de una manivela para el eje del actuador (servomotor).



Figura 77 Manivela actuador. Autoría propia

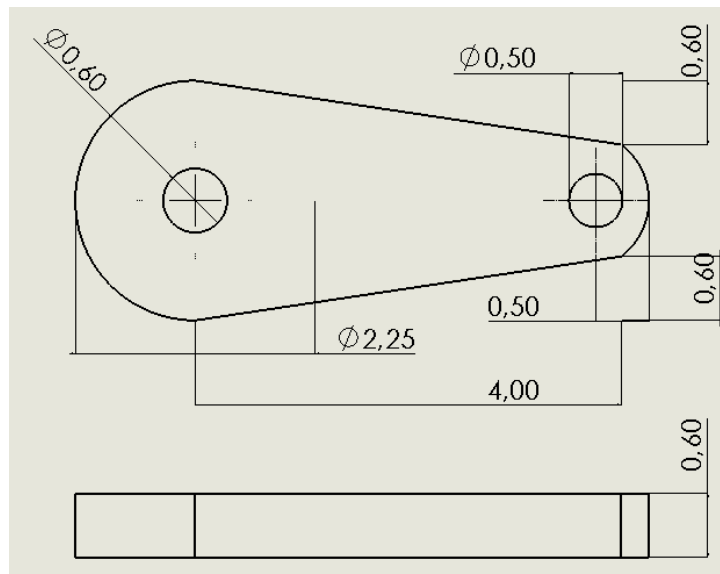


Figura 78 Medidas manivela actuador. Autoría propia

- Se realiza la impresión 3D de una pieza en forma de L que es usada como soporte para el potenciómetro.



Figura 79 Soporte Potenciómetro. Autoría propia

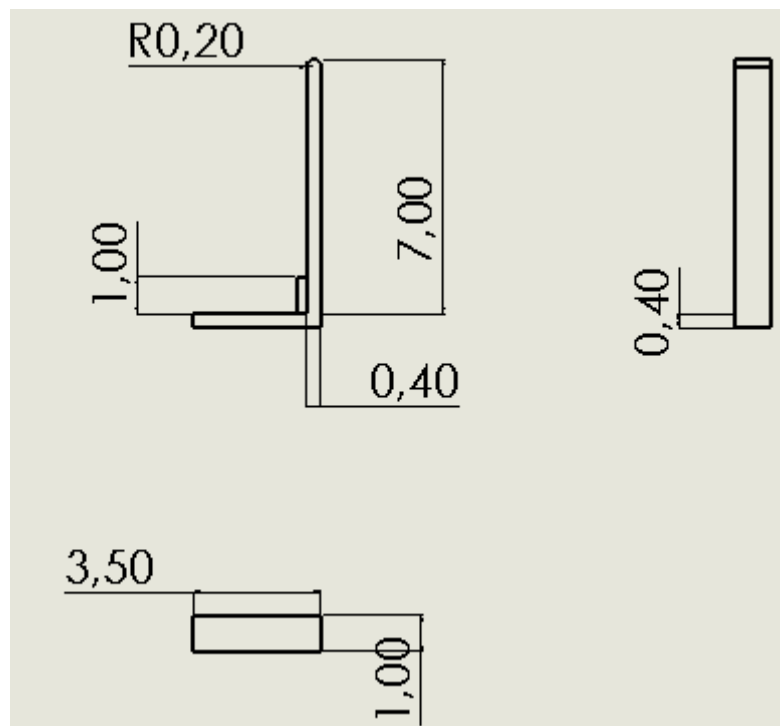


Figura 80 Medidas de soporte de potenciómetro. Autoría propia

- **Ensamble 3:** Se realiza el ensamble para el servomotor y el potenciómetro.



Figura 81 Ensamble de actuador y potenciómetro. Autoría propia

- **Ensamble 4:** se hace la unión del ensamble 1,2 y 3 junto con la madera que sirve de soporte para el sistema ball and beam.



Figura 82 ball and beam. Autoría propia

- Se compran dos varillas de acero que sirven como guía para el desplazamiento de la bandera para el setpoint manual.



Figura 83 Varillas de acero inoxidable. Autoría propia

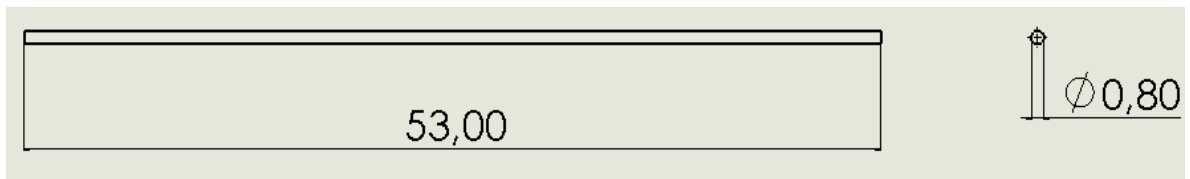


Figura 84 Medidas de varillas de acero inoxidable. Autoría propia

- Se lleva a cabo la impresión 3D de la base 1 en la cual se instalará el sensor ultrasónico para el setpoint de forma manual.



Figura 85 Base 1 para setpoint forma manual. Autoría propia

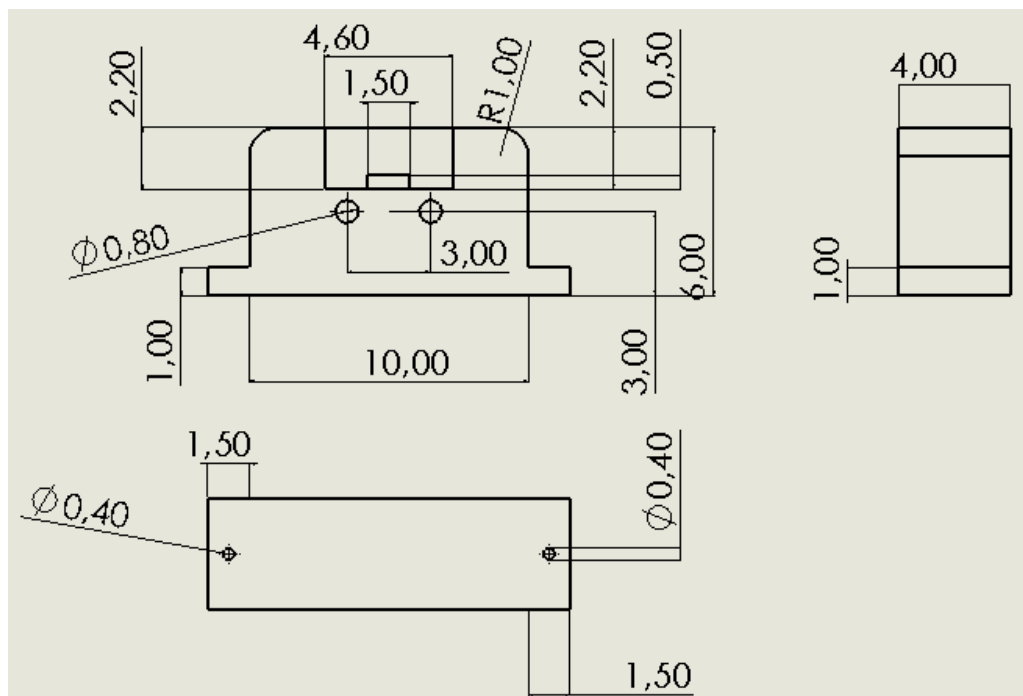


Figura 86 Medidas para base 1 setpoint forma manual. Autoría propia

- Se lleva a cabo la impresión 3D de la base 2, que junto con la base 1 sirve para el soporte de las varillas.

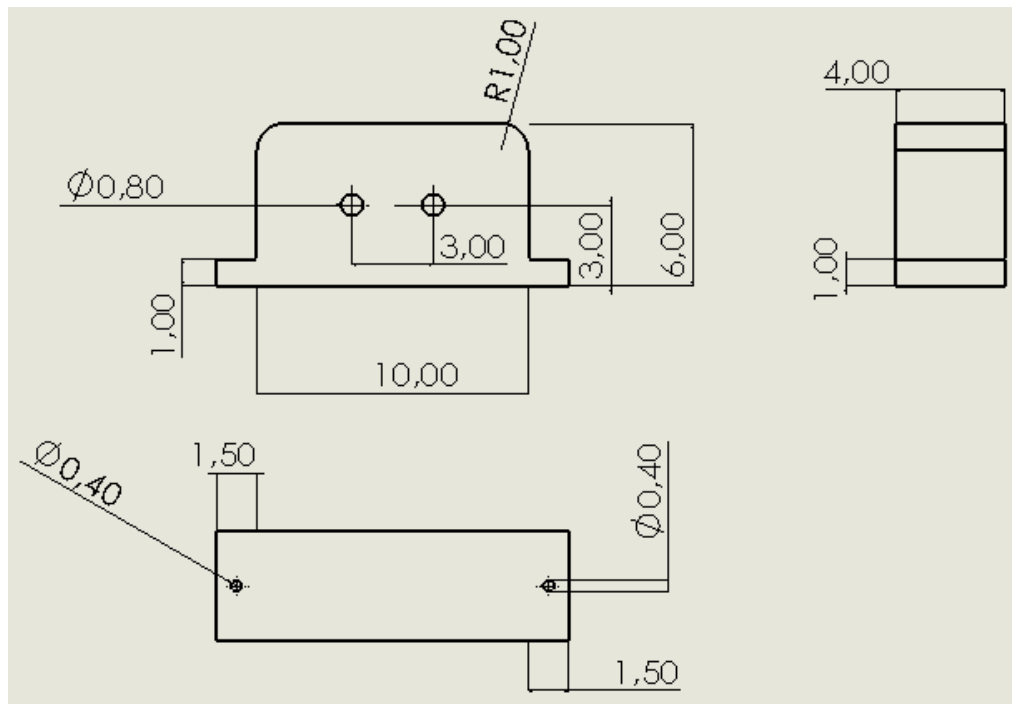


Figura 87 Medidas para base 2 setpoint forma manual. Autoría propia

- **Ensamble 5:** se ensambla las bases junto con las varillas.



Figura 88 Forma manual del sistema ball and beam. Autoría propia

- **Ensamble 6:** se junta la pantalla con la carcasa hecha en acrílico.

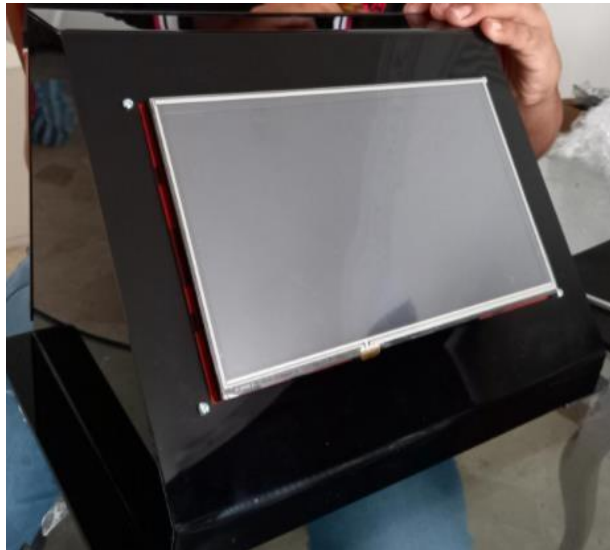


Figura 89 Pantalla HMI. Autoría propia

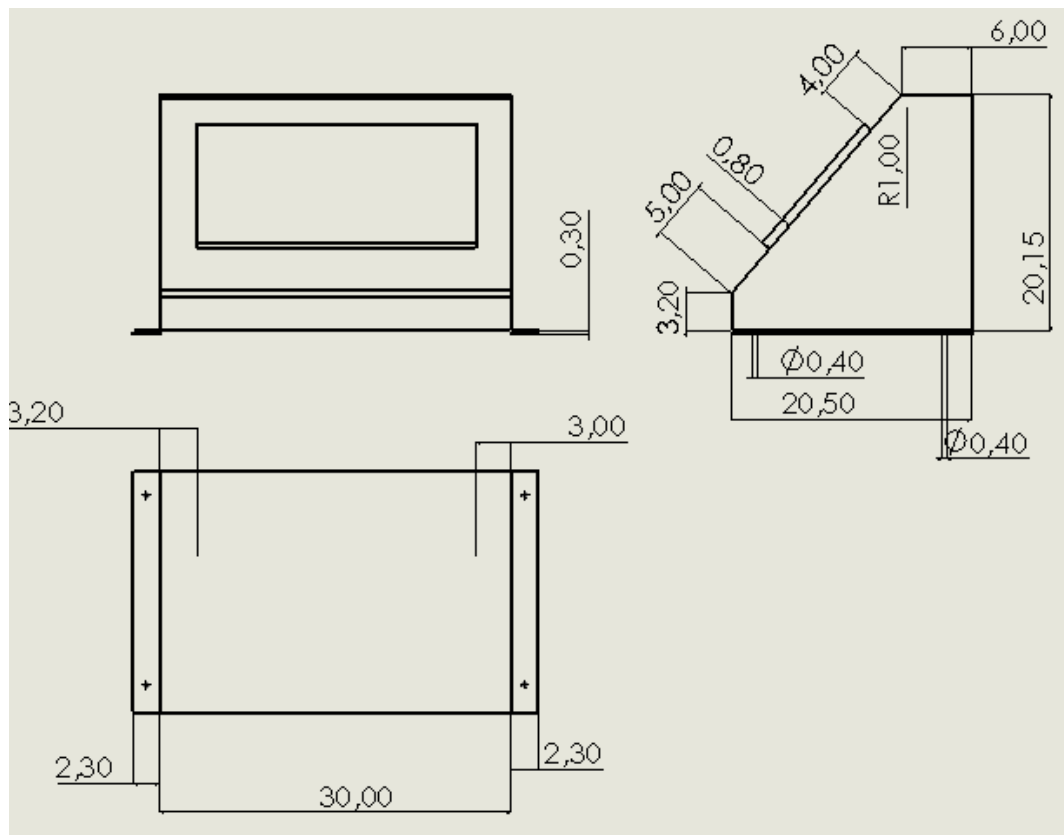


Figura 90 Medidas pantalla con carcasa. Autoría propia

- Se procede a pegar la calcomanía en la base principal.

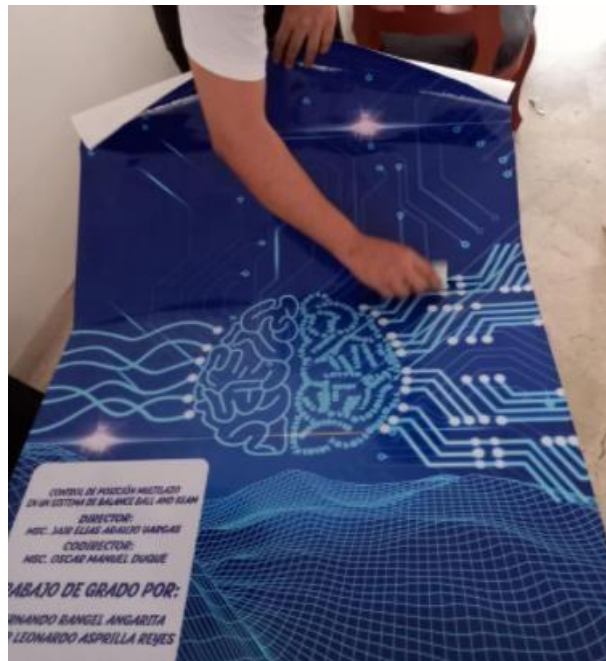


Figura 91 Fondo del proyecto. Autoría propia

- **Ensamble 6:** Se lleva a cabo el ensamble de todos los componentes en la base principal.



Figura 92 Montaje de los componentes físicos sin la parte eléctrica. Autoría propia

Para la parte de visión artificial se monta en la base una caja, la cual va a servir para hacer contrastes de luz homogéneos para una buena medición con la cámara.



Figura 93 Componente de trabajo para área de visión artificial. Autoría propia

CAPITULO 4

7. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA “BALL AND BEAM”

7.1. MODELADO DEL PROCESO

El modelado matemático se representa por las diferentes ecuaciones diferenciales las cuales están presente en este tipo de sistemas, aunque se pueden encontrar diferentes modelos dependiendo de los diferentes inconvenientes que se tenga al momento de implementar dicho control.

Para este sistema debemos definir los grados de libertad que posee, así como la definición de cada uno. En este caso tenemos dos grados de libertad los cuales se especifican a continuación

- Posición de la bola (m)
- Angulo de giro de la viga

Estas serán las variables en función de las cuales se encontrarán las ecuaciones dinámicas las cuales rigen el sistema, por tanto, mediante las ecuaciones de Newton se hace énfasis sobre el agente exterior que actúa sobre el cuerpo (la fuerza), con Lagrange se manejan magnitudes asociadas al cuerpo (energía cinética y potencial)

Se parte inicialmente de la ecuación de Lagrange (ecuación 1) la cual se presenta a continuación

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (1)$$

q_i = cada una de las coordenadas generalizadas

$L = T - V$, donde T es la energía cinética y V la potencial

F = fuerza de disipación Rayleigh

Q = fuerza generalizada

Como coordenadas se eligen la posición de la bola a lo largo de la viga (q_1) y el Angulo de giro con respecto a la vertical (q_2).

Se empieza calculando la energía cinética total del sistema que será la que aporte la viga más la que aporte el carro, que son dos piezas en movimiento.

$$T = T_{viga} + T_{car} \quad (2)$$

$$T_{viga} = T_{rot} = \frac{1}{2} I_v \omega_v^2 = \frac{1}{2} I_v \dot{q}^2 \quad (3)$$

$$T_{car} = T_{tras} + T_{rot} = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} I_b \omega_b^2 \quad (4)$$

El carro se va a desplazar en el eje vertical y horizontal debido a su propio movimiento y la inclinación de la viga. Por lo tanto este movimiento se puede evaluar dentro de un triángulo, obteniendo la siguiente ecuación:

$$v_b^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \quad (5)$$

Donde:

$$x = q_1 * \cos q_2 \quad (6)$$

$$y = q_1 * \sin q_2 \quad (7)$$

$$\dot{x} = \dot{q}_1 \cos q_2 - q_1 \dot{q}_2 \sin q_2 \quad (8)$$

$$\dot{y} = \dot{q}_1 \sin q_2 + q_1 \dot{q}_2 \cos q_2 \quad (9)$$

Sustituyendo en la ecuación 5:

$$v_{car}^2 = \dot{q}_1^2 \cos^2 q_2 + q_1^2 \dot{q}_2^2 \sin^2 q_2 - 2\dot{q}_1 q_1 \dot{q}_2 \sin q_2 + \dot{q}_1^2 \sin^2 q_2 + q_1^2 \dot{q}_2^2 \cos^2 q_2 + 2\dot{q}_1 q_1 \dot{q}_2 \cos q_2 = \dot{q}_1^2 + q_1^2 \dot{q}_2^2 \quad (10)$$

La velocidad angular del carro se calcula de la siguiente forma:

$$\omega_{car} = \frac{\dot{q}_1}{R_{car}} \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación 2:

$$T = \frac{1}{2} I_v \dot{q}^2 + \frac{1}{2} m_{car} (\dot{q}_1^2 + q_1^2 \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_{car} \left(\frac{\dot{q}_1}{R_{car}} \right)^2 \quad (12)$$

$$T = \frac{1}{2} I_v \dot{q}^2 + \frac{1}{2} m_{car} \dot{q}^2 + \frac{1}{2} m_{car} \frac{1}{R_b^2} q^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} \frac{I_{car}}{R_b^2} \dot{q}^2 \quad (13)$$

Ahora, siguiendo el mismo procedimiento, se calcula la energía potencial de la viga, tomando como referencia la posición horizontal.

$$V = V_{VIGA} + V_{CAR} \quad (14)$$

$$V_{VIGA} = m_v g r \cos q_2 \quad (15)$$

Donde g es la aceleración gravitacional y se considera negativa (-9.8 m/s) para y r es la distancia desde la línea que pasa por el centro de la bola hasta el eje del motor,

la cual se va a simplificar y considerar muy pequeña en relación con las demás medidas y, por tanto, se puede despreciar la energía potencial de la viga, $V_{viga} \approx 0$.

$$V_{CAR} = -m_{car} g q_1 \sin q_2 \quad (16)$$

Por último, para aplicar la función lagrangiana, falta por calcular la fuerza de disipación de Rayleigh, que en este caso se considera nula por no contener ninguna fuerza disipativa.

Como se tienen dos coordenadas generalizadas, se obtendrán dos ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema, donde la fuerza generalizada asociada a la coordenada posición de la bola es nula y la fuerza generalizada asociada a la coordenada de la viga es el par del motor.

$$\left(m_{car} + \frac{I_{car}}{R_{car}^2}\right) \ddot{q}_1 + m_{car} g \sin(q_2) - m_{car} q_1 \dot{q}_2^2 = 0 \quad (17)$$

$$(I_v + m_{car} q_1^2) \ddot{q}_2 + 2m_{car} q_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_{car} g q_1 \cos(q_2) = r \quad (18)$$

Así quedaría definido el sistema dinámicamente, donde aparecen tres constantes, la masa del carro (m_c) y los momentos de inercia de la viga (I_v) y el carro (I_{car}).

Sin embargo, se ha despreciado la segunda ecuación, ya que no se va a cerrar un lazo de control sobre el ángulo de la viga y resulta intrascendente en el modelo en función de transferencia.

Para obtener el modelo aplicamos a la primera ecuación la transformada de Laplace.

Para obtener la función de transferencia a partir de una ecuación diferencial esta debe ser necesariamente lineal y, como en este caso no lo es, hay que linealizarla en torno a un punto de equilibrio estable, que en este caso el único posible es $q_2=0$, que es la posición horizontal de la viga. Cabe recordar que cuando se linealiza una ecuación no lineal, el modelo que se obtiene solo se ajusta bien para valores cercanos al punto de equilibrio.

Por lo tanto, cuando q_2 tiende a cero el seno de q_2 tiende a q_2 .

$$\left(m_{car} + \frac{I_{car}}{R_{car}^2}\right) \ddot{q}_1 + m_{car} (q_2) = 0 \quad (19)$$

$$(m_{car} + \frac{I_{car}}{R_{car}^2}) \ddot{q}_1 = -m_{car} g (\frac{d}{L}) \theta_2 \quad (20)$$

$$(m_{car} + \frac{I_{car}}{R_{car}^2}) X(s)s^2 = -m_{car} g (\frac{d}{L}) \theta(s) \quad (21)$$

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = - \frac{m_{car} g (\frac{d}{L})}{L (m_{car} + \frac{I_{car}}{R_{car}^2}) s^2} \quad (22)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{0.432096}{s^2} \quad (23)$$

7.2. MODELADO DEL XYZROBOT SMART SERVO A1-16

El modelado del XYZrobot Smart Servo A1-16 se hace de manera experimental, ya que, para hacerlo de forma axiomática se necesitan varios datos técnicos que el datasheet no tiene, por lo tanto se hará una toma de datos para poder encontrar el modelo.

Para encontrar el número de muestras necesarias para un error del 5% se toma de base el libro de “análisis de diseño y experimento de Román Salazar”. Sabiendo que k es la cantidad de métodos para identificar el proceso, y que conocemos inicialmente el número de réplicas por tratamiento, n0. También se tiene una idea aproximada del valor de σ (la desviación estándar del error aleatorio), así como una idea de la magnitud de las diferencias, dT, entre tratamientos que le interesa detectar.

k = 1 método (identificación por medio de dos escalones de entrada)

n0 = 5 pruebas (pensadas inicialmente)

dT = 1

Se espera que cada método tenga una variabilidad intrínseca de $\sigma = 1.5$; esto debido a factores no controlados (habilidad del operador, cansancio, variabilidad de las partes a ensamblar, error de medición del tiempo de ensamble, etcétera).

Considerando,

$$n = \frac{2(t_{(\alpha/2, N-k)})^2 CM_E}{(LSD)^2} \quad (24)$$

Donde para un error del 5%

$$\alpha = 0.05$$

$$N = k * n_0 \quad (25)$$

$$\sigma^2 = CM_e(\text{el cuadrado medio del error})$$

$$LSD = dT$$

Teniendo que,

$$n = \frac{2(t_{0.05, k \times n_0 - k})^2 \times \sigma^2}{dT^2} \quad (26)$$

Considerando la tabla de T de Student para la relación entre $\alpha/2$ y $N-k$:

Tabla 19 puntos críticos para la distribución T de Student

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842
11	1.3634303	1.7958848	2.2009852	2.4906639
12	1.3562173	1.7822876	2.1788128	2.4607002
13	1.3501713	1.7709334	2.1603687	2.4358452
14	1.3450304	1.7613101	2.1447867	2.4148977
15	1.3406056	1.7530504	2.1314495	2.397005

Aplicando la ecuación: $N - k = k * n_0 - k$, se tienen los grados de libertad, por lo tanto:

$$N - k = k * n_0 - k = 1 * 5 - 1 = 4 \text{ grados de libertad}$$

Haciendo la relación $\alpha/2$, se tiene:

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{0.05}{2} = 0.025 \quad (27)$$

Observando el valor en la tabla 1 con los anteriores cálculos se puede apreciar que el valor seleccionado es 2.1318468

Reemplazando en la ecuación

$$n = \frac{2(t_{0.05, k \times n_0 - k})^2 \times \sigma^2}{dT^2} \quad (28)$$

$$n = \frac{2(2.7764451)^2 \times 1.5^2}{1^2}$$

$$n = 34.688 \text{ muestras}$$

$$n \approx 35 \text{ muestras}$$

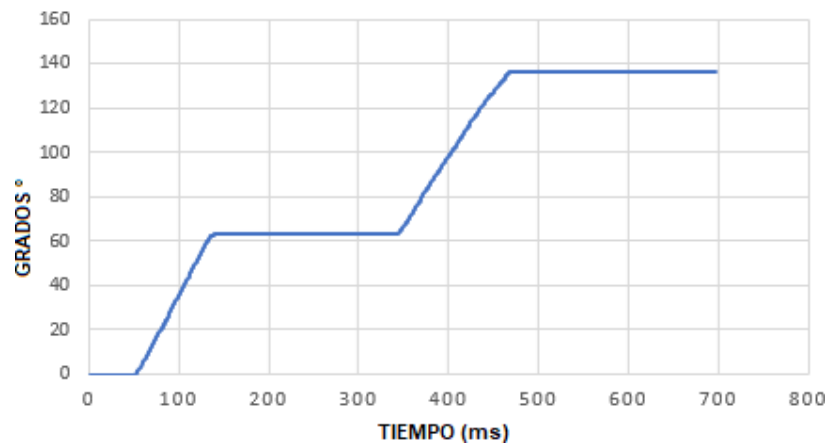
Por lo tanto para un valor de error del 5% se necesitan 35 muestras experimentales.

Teniendo el número de muestras se realiza la toma de datos en el software Arduino, usando como elemento de medición un potenciómetro, el código utilizado se encuentra en el [anexo 1](#).

Luego de haber obtenido las 35 datas se acomodan en un archivo Excel.

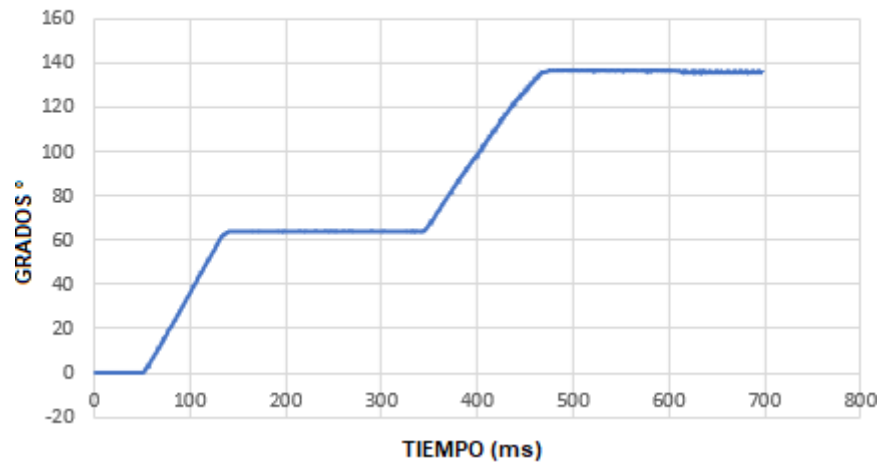
Las gráficas que se obtienen con el promedio de 70%, promedio del 30% y desviación estándar del 70% son las siguientes:

PROMEDIO 70%

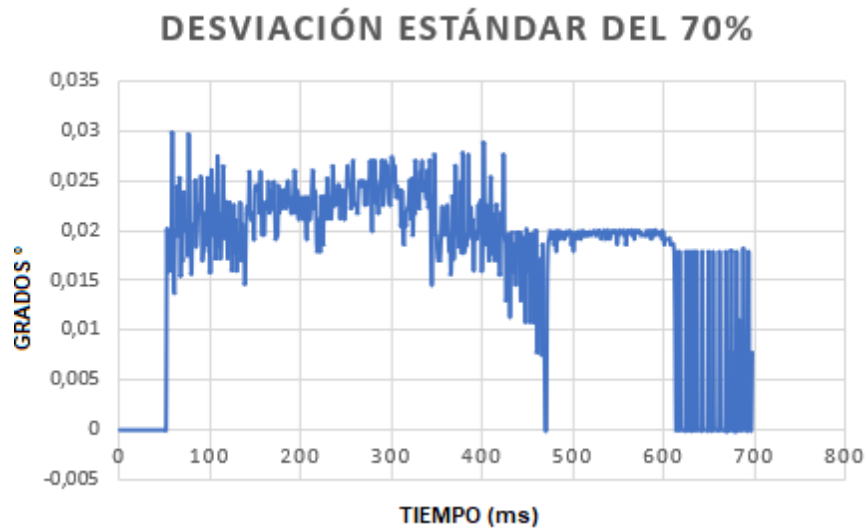


Respuesta a doble escalón con el promedio del 70%

PROMEDIO 30%



Respuesta a doble escalón con el promedio del 30%



Desviación estándar con el promedio del 70%

Con las datas obtenidas se procede a realizar el proceso matemático para encontrar la función que represente el modelo del servo.

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{136.04 - 63.36}{500 - 291} = 0.3477511962 \quad (29)$$

$$t_{28} = (72.68 * 28,3\%) + 63.36 = 83.92844$$

Tiempo (ms)	Medicion (°)
377	83,92

$$t_{28} = 377 - 300 = 77\text{ms} = 0.077\text{s}$$

$$t_{63} = (72.68 * 63,2\%) + 63.36 = 109.29376$$

Tiempo (ms)	Medicion (°)
418	109,24

$$t_{63} = 418 - 300 = 118\text{ms} = 0.118\text{s}$$

Al encontrar los tiempos en los cuales se establece la señal de salida le aplicamos las ecuaciones para hallar el τ del sistema y el tiempo muerto.

$$\tau = \frac{3}{2} (t_{63} - t_{28}) \quad (30)$$

$$\tau = \frac{3}{2} (0.118 - 0.077)$$

$$\tau = 0.0615$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (31)$$

$$t_m = 0.118 - 0.0615$$

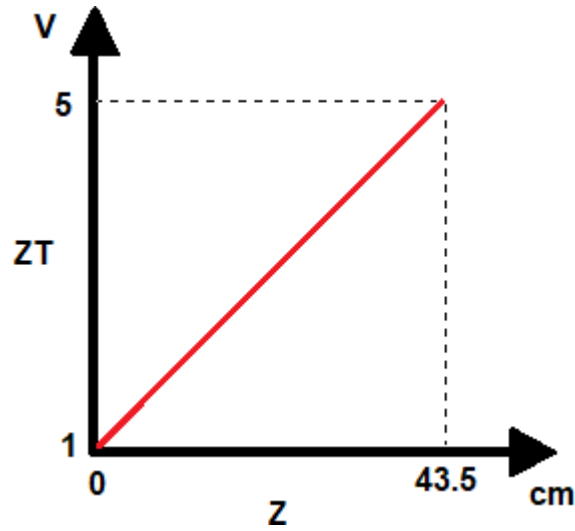
$$t_m = 0.0565$$

Por lo tanto la función de transferencia que representa el modelo del servo es:

$$G(s) = \frac{0.3477511962}{0.0615s + 1} \quad (32)$$

7.3. MODELADO DEL TRANSMISOR PARA SENSOR ULTRASONICO

Se hace necesaria la implementación de un transmisor que permita llevar la señal en el protocolo industrial. Para ello se propone un sistema de adquisición conformado por una entrada del sensor y una salida de un ADC (Convertidor análogo digital), la cual estará en el estándar 1-5V, en función de la posición del carro, en donde 1 voltio representa la posición más baja y 5 voltios la posición más alta, y así con esta idea se cuenta en la planta piloto con un sensor-transmisor de posición en el estándar industrial.



Gráfica de voltaje vs cm

$$m = \frac{5 - 1}{43.5 - 0} = \frac{8}{87}$$

$$ZT(t) - 1 = \frac{8}{87} (Z(t) - 0) \quad (33)$$

$$ZT(t) = \frac{8}{87} Z(t) + 1$$

Posteriormente se halla el modelo dinámico del sensor transmisor, pues la dinámica es lo que nos interesa en el sistema.

Para llegar a este punto se omite el sistema de primer orden con tiempo muerto según el modelo determinístico, pues la matemática se resume en la siguiente ecuación:

$$\frac{dy(t)}{d(t)} = -\frac{y(t)}{r} + \frac{k}{r} u(t) \quad (34)$$

$$\frac{dZT(t)}{d(t)} = -\frac{ZT(t)}{r} + \frac{8}{87r} Z + \frac{1}{r} \quad (35)$$

A continuación se modelará el cálculo del transmisor en simulink, se comprobará la entrada de posición medida por el sensor, obteniendo a la salida una señal con protocolo estándar 1-5 V.

El tao del sistema debe ser 10 veces más rápido que el E.F.C., por lo tanto:

$$r = \frac{0.0615}{10} = 0.00615$$

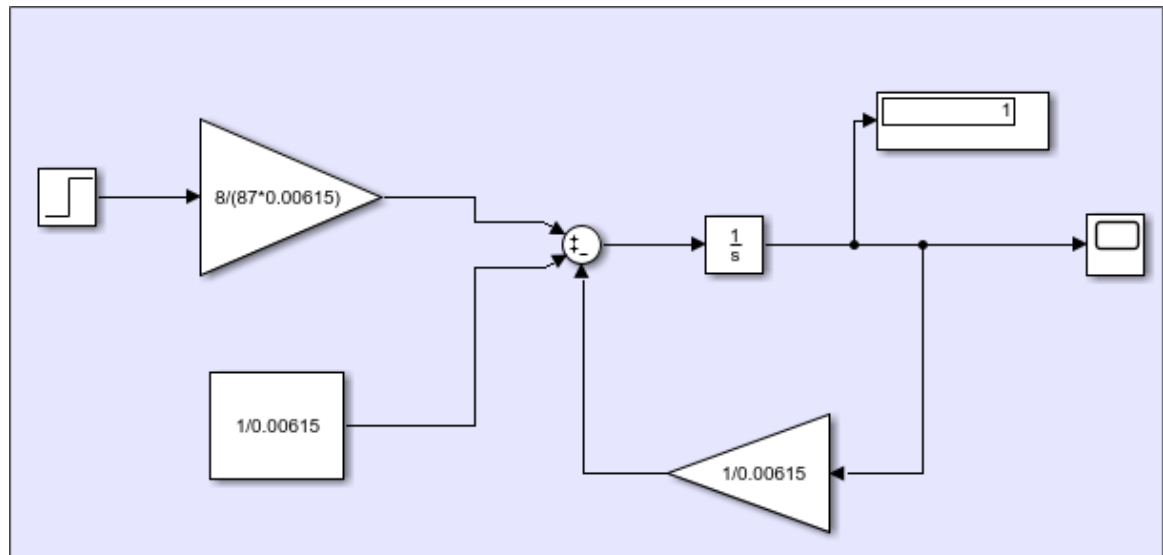
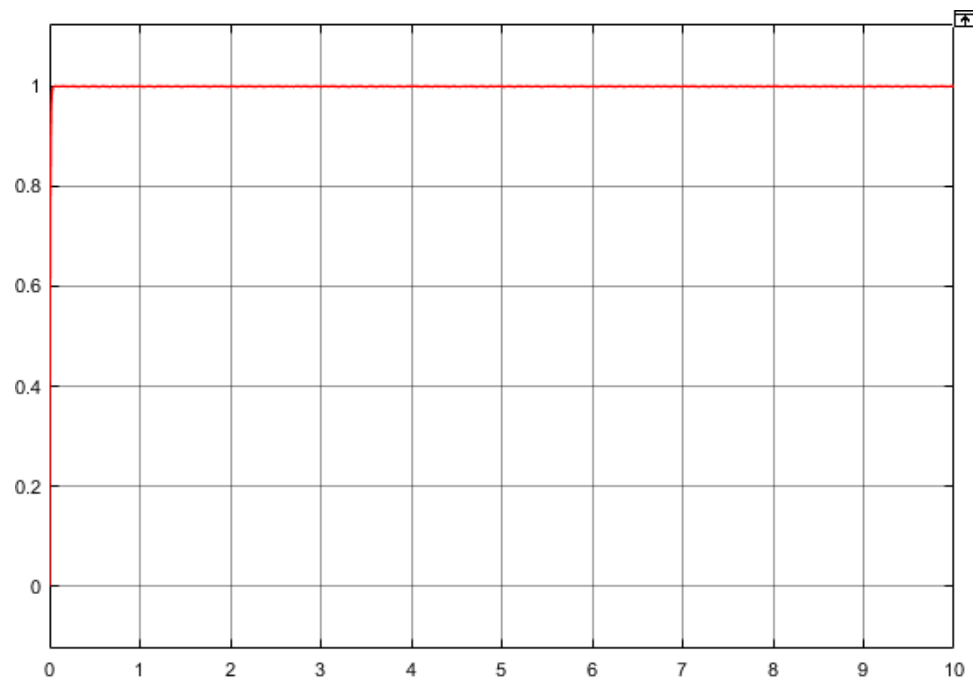


Diagrama de bloques para simulación S/T de US016

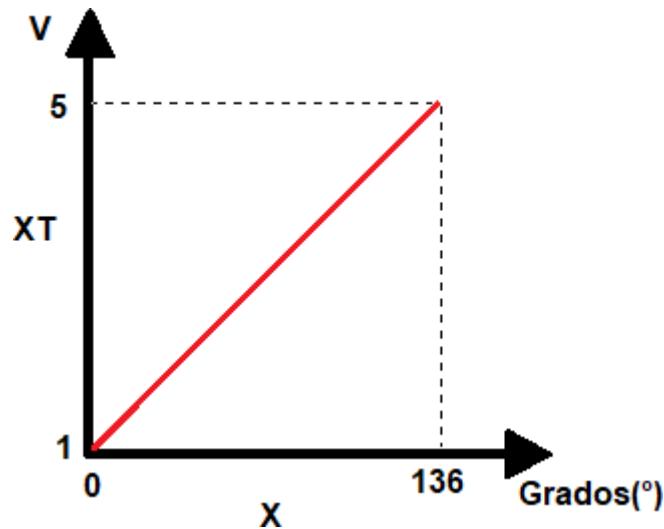
Con un set point de 0 se obtiene una señal de salida de 1 V.



Respuesta del sistema con una consigna de 0 cm

7.4. MODELADO DEL TRANSMISOR PARA POTENCIOMETRO

Dado que el protocolo del sensor no es estándar, se hace necesaria la implementación de un transmisor que permita llevar la señal en el protocolo industrial. Para ello se propone un sistema de adquisición conformado por una entrada del sensor y una salida de un ADC (Convertidor análogo digital), la cual estará en el estándar 1-5V, en función del ángulo de inclinación del sistema, donde 1 voltio representa el ángulo más bajo y 5 voltios el ángulo más alto definido, y con esta idea se cuenta en la planta piloto con un sensor-transmisor de ángulo en el estándar industrial.



Gráfica de voltaje vs grados

$$m = \frac{5 - 1}{136 - 0} = \frac{1}{34}$$

$$XT(t) - 1 = \frac{1}{34}(X(t) - 0) \quad (36)$$

$$XT(t) = \frac{1}{34}X(t) + 1 \quad (37)$$

Posteriormente se halla el modelo dinámico del sensor transmisor, pues la dinámica es lo que nos interesa en el sistema.

Para llegar a este punto se omite el sistema de primer orden con tiempo muerto según el modelo determinístico, pues la matemática se resume en la siguiente ecuación:

$$\frac{dy(t)}{d(t)} = -\frac{y(t)}{r} + \frac{k}{r} u(t) \quad (38)$$

$$\frac{dXT(t)}{d(t)} = -\frac{XT(t)}{r} + \frac{1}{34r} X + \frac{1}{r} \quad (39)$$

A continuación, se modelará el cálculo del transmisor en simulink, se comprobará la entrada de posición medida por el sensor, obteniendo a la salida una señal con protocolo estándar 1-5 V.

El tao del sistema debe ser 10 veces más rápido que el E.F.C., por lo tanto:

$$r = \frac{0.0615}{10} = 0.00615$$

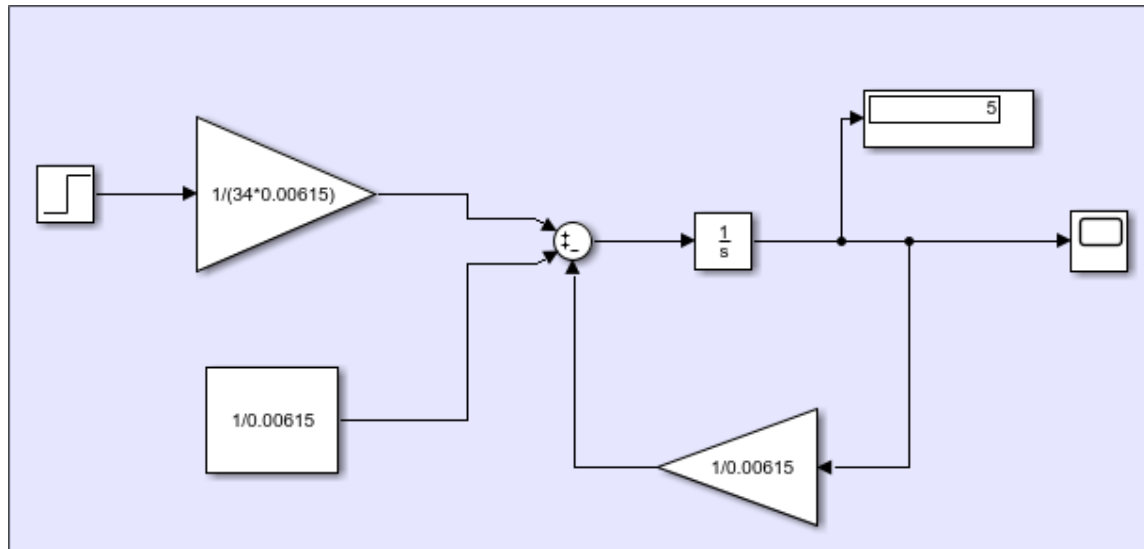
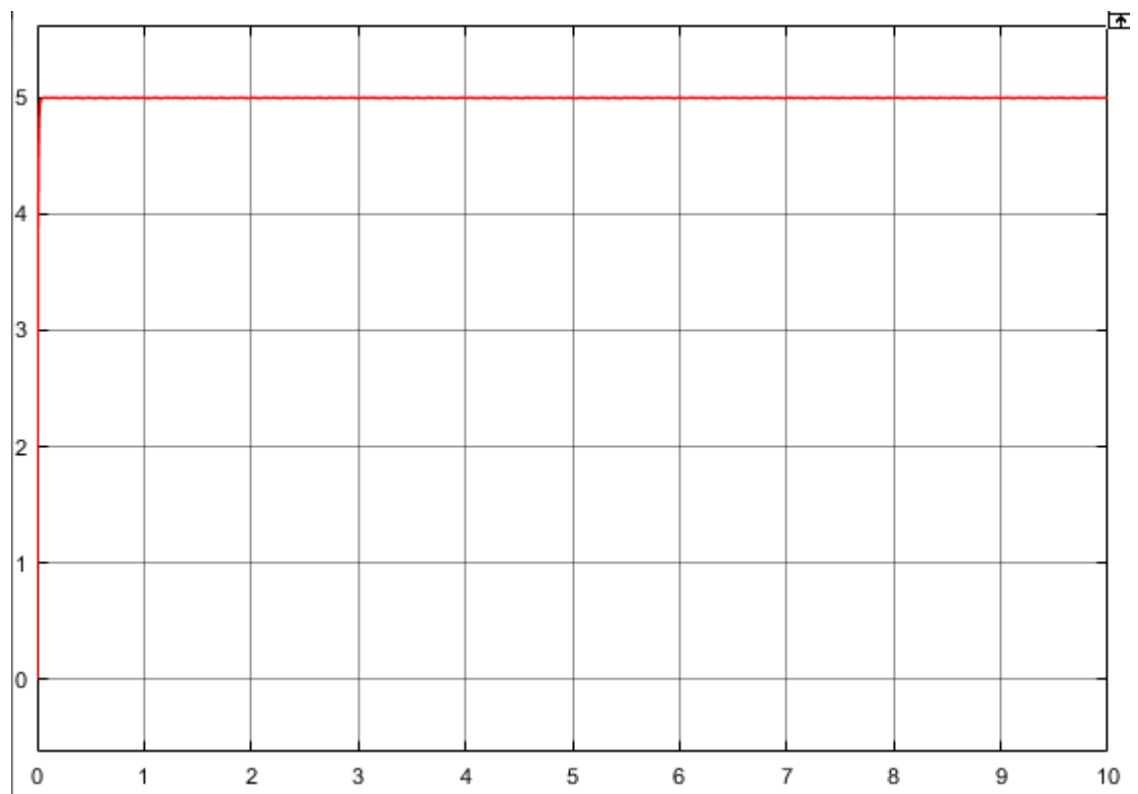


Diagrama de bloques para simulación S/T de potenciómetro

Con un set point de 136 se obtiene una señal de salida de 5 V.



Respuesta con una consigna de 136 grados

8. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El análisis de la estabilidad que presentan los sistemas al estar frente a determinadas variaciones de las condiciones iniciales y de los parámetros que lo caracterizan, es hoy uno de los importantes estudios que se realizan a los sistemas dinámicos

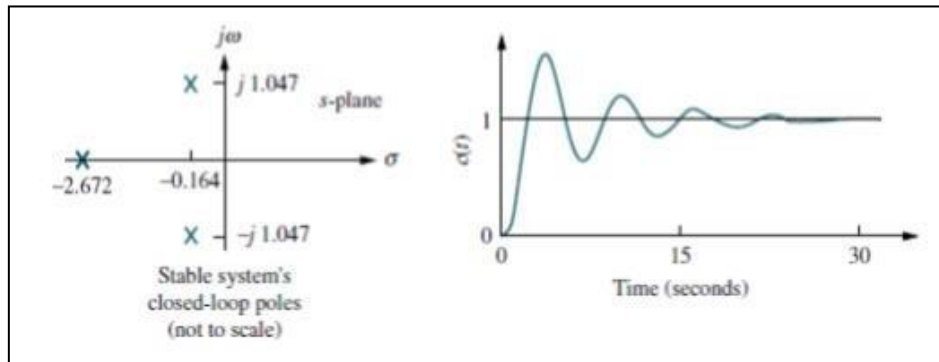


Figura 94 sistema estable

Fuente: sistema estable [en línea]. Disponible en: <https://dademuch.com/2018/03/15/estabilidad-de-un-sistema-de-control/>

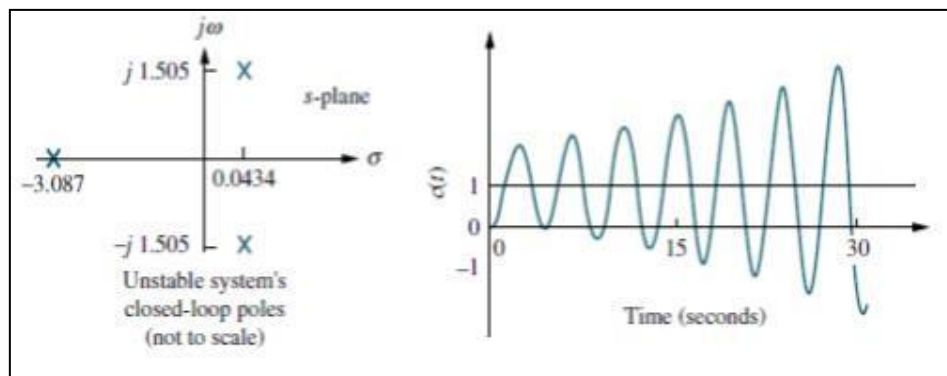


Figura 95 Sistema inestable

Fuente: sistema estable [en línea]. Disponible en: <https://dademuch.com/2018/03/15/estabilidad-de-un-sistema-de-control/>

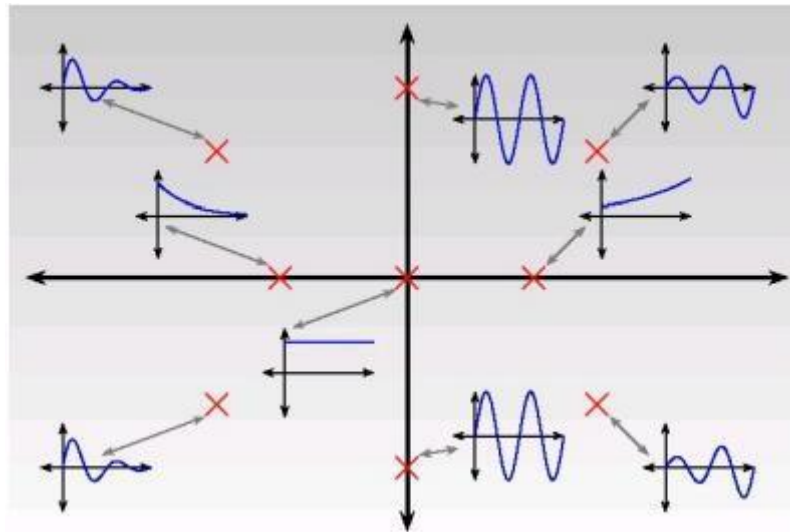


Figura 96 Estabilidad de un sistema en función de la posición de los polos

Fuente: sistema estable [en línea]. Disponible en: <https://dademuch.com/2018/03/15/estabilidad-de-un-sistema-de-control/>

ANÁLISIS ESTABILIDAD LAZO ABIERTO

Como primera medida se analiza el sistema (planta) a lazo abierto para observar su comportamiento

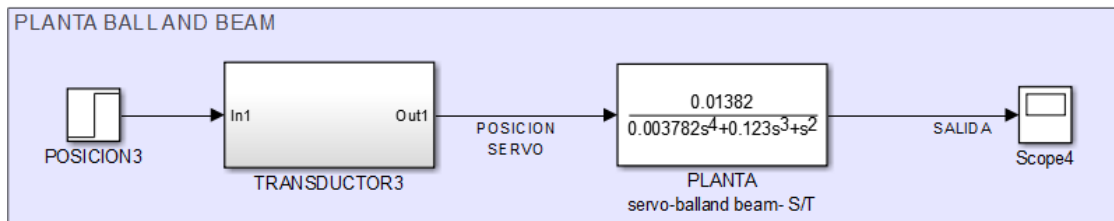


Figura 97 Diagrama de bloques lazo abierto. Autoría propia

Señal de salida con una consigna de 40 cm

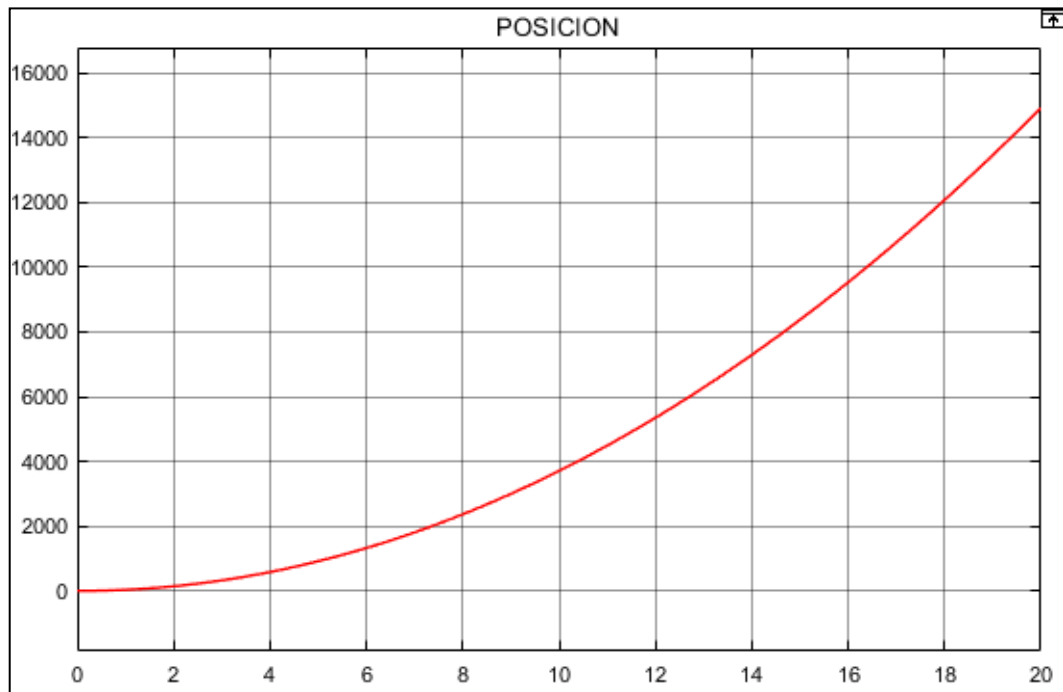


Figura 98 respuesta del sistema a lazo abierto. Autoría propia

Como se puede observar en la figura anterior la salida del sistema da una respuesta exponencial, la cual no es convergente y tiende a infinito, por lo tanto se debe aplicar métodos de control congruentes a este tipo de respuesta, por lo cual se utiliza el método de lugar de las raíces.

Para este caso se analizará donde se encuentran ubicados los polos del sistema mediante la función `zplane` de Matlab.

```
num = [0.3477512];
den = [0.0615 1];
num1 = [0.432096];
den1 = [1 0 0];
num2 = [0.092];
den2 = [0.0615 1];
S = tf(num1,den1)
U = tf(num2,den2)
M = tf(num,den)
H = M*S*U
Z=zero(H)
P=pole(H)
zplane(Z,P)
```

Figura 99 Programa en Matlab para graficar los polos y ceros. Autoría propia

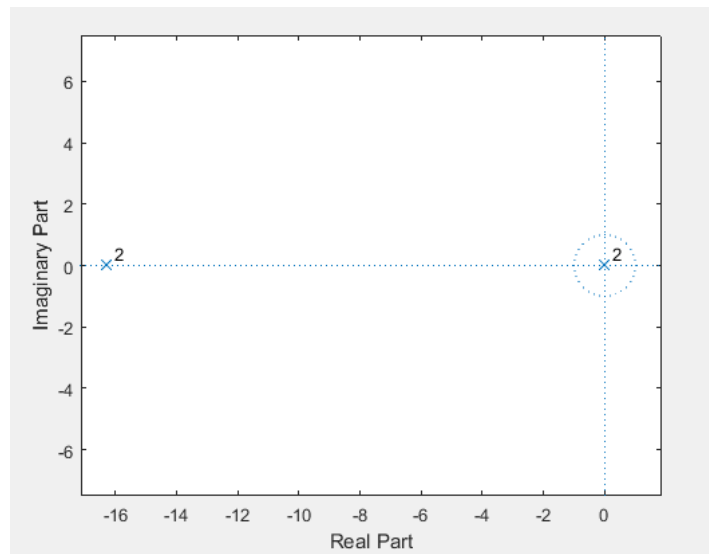


Figura 100 Polos del sistema. Autoría propia

Como se puede observar esta función tiene 4 polos, en aplicación del Teorema de estabilidad, dice que un sistema lineal e invariante en el tiempo descrito por una función de transferencia $G(s)$ es estable si y solo si todos sus polos están situados en el semiplano izquierdo abierto del plano complejo, se puede afirmar que, si un sistema tiene algún polo con parte real positiva o nula, entonces será inestable. Dado que el sistema bajo estudio tiene dos polos los cuales tienen parte nula, se confirma que es inestable en lazo abierto.

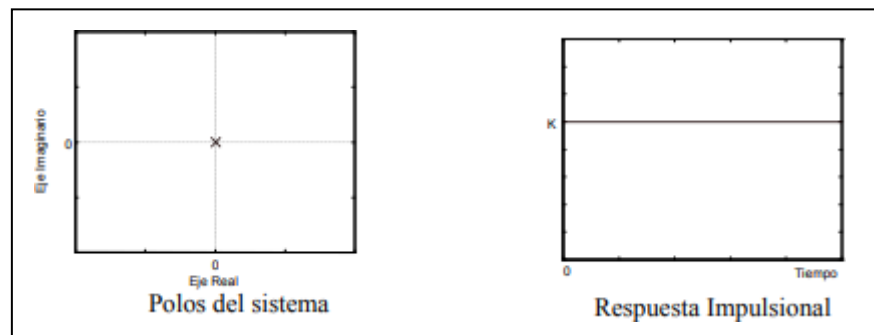


Figura 101 Respuesta de un sistema en función de la posición de los polos en el origen

Fuente: polos [en línea]. Disponible en:
https://ocw.unican.es/pluginfile.php/763/course/section/813/capitulo_5.pdf

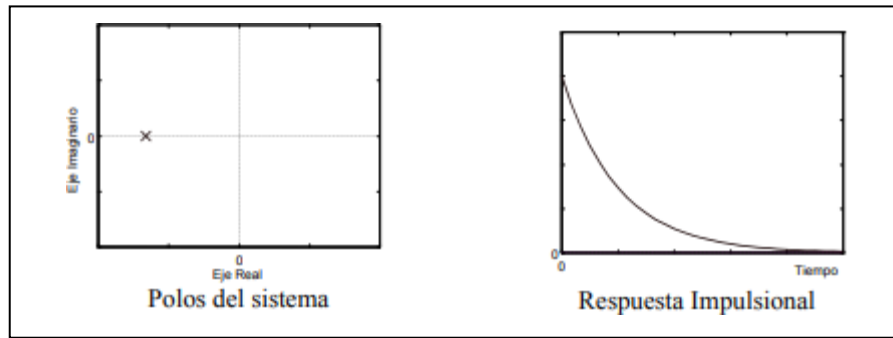


Figura 102 Respuesta de un sistema en función de la posición de los polos en el eje imaginario negativo

ANALISIS ESTABILIDAD LAZO CERRADO CONTROLADOR P

Este control se hará en lazo cerrado y utilizando el concepto de realimentación negativa, que implica que la salida del sistema vuelva a la entrada y se calcule la diferencia de esta con la referencia que se quiere alcanzar, dando lugar a un error que será lo que le entre al bloque del controlador y, la salida de este será la entrada al modelo del sistema.

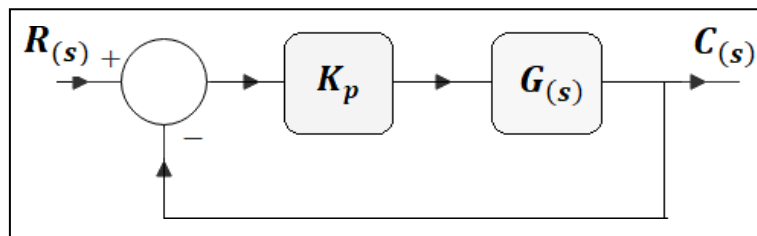


Figura 103 Diagrama de bloques control P. Autoría propia

Fuente: Diagrama de control [en línea]. Disponible en: https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap9_html/capitulo-9.html

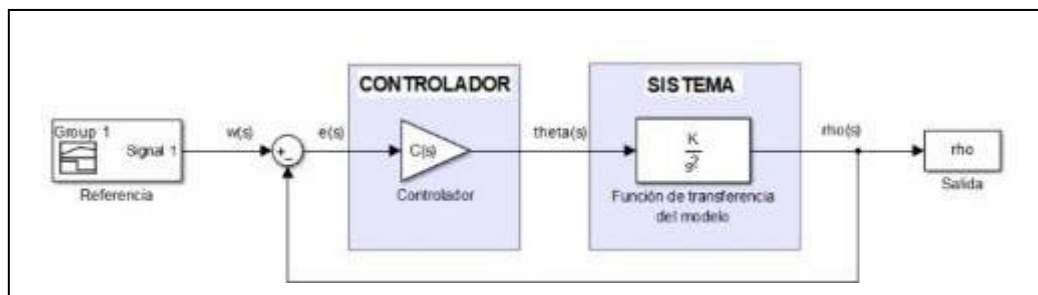


Figura 104 Lazo de control con realimentación negativa. Autoría propia

Fuente: Diagrama de control [en línea]. Disponible en: https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap9_html/capitulo-9.html

Teniendo una ganancia de 9 se obtiene la siguiente posición de los polos

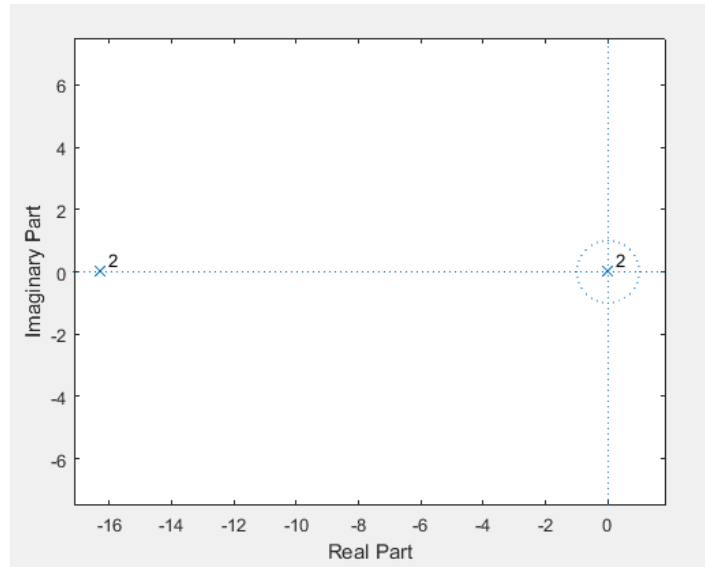


Figura 105 Polos del sistema control P. Autoría propia

Se aplica una contante proporcional con un setpoint de 20, de lo cual se obtiene la siguiente respuesta en la simulación (figura 107).

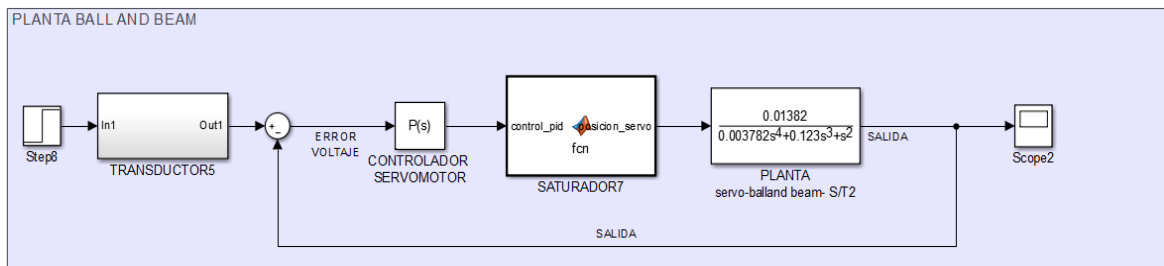


Figura 106 Diagrama de bloques lazo cerrado control P. Autoría propia

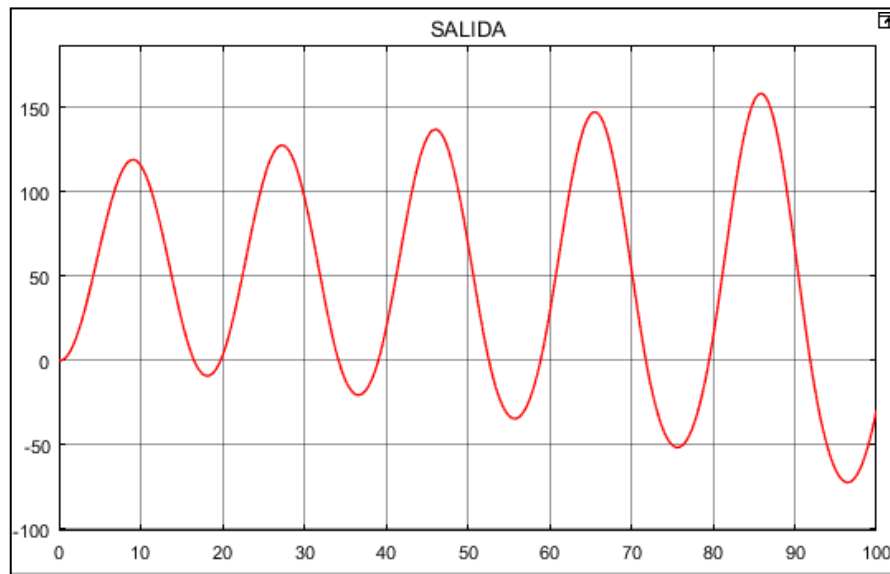


Figura 107 Salida controlador Proporcional. Autoría propia

Como se puede observar con el control proporcional no se logra tener estabilización ni llegar al setpoint indicado, se presenta una respuesta inestable

ANALISIS ESTABILIDAD LAZO CERRADO CONTROLADOR PD

Como se pudo observar en el anterior apartado no se logró tener estabilización por tal motivo se tienen dos opciones posibles, el derivativo o el integral. El primero de ellos tiene como característica principal mejorar el régimen transitorio y el segundo, eliminar el error en régimen permanente. Debido a que, en realidad no se alcanza régimen permanente en el apartado anterior, es más lógico aplicar un control PD para lograr estabilizar el transitorio con la introducción de este.

Se aplica una consigna de 20 cm y se observa el comportamiento de la respuesta en la figura 109.

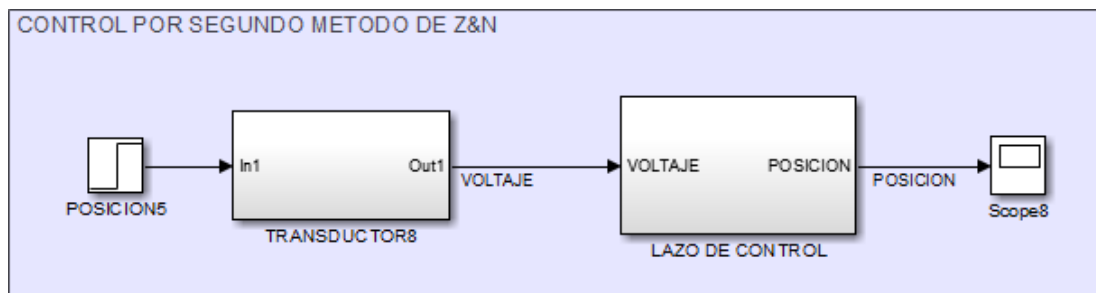


Figura 108 Diagrama de bloques controlador PD. Autoría propia

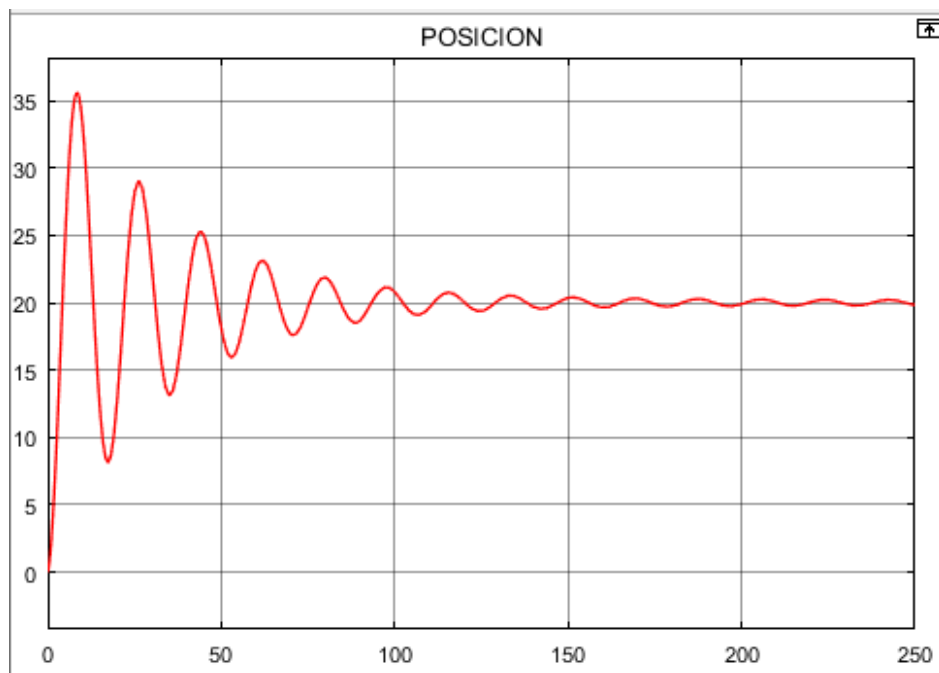


Figura 109 Respuesta controlador PD. Autoría propia

Como se puede observar la salida del sistema, se tiene un control, aunque tiene estabilización presenta error en estado estacionario.

Por lo anterior para poder llevar a cabo el estudio de estabilización pero que se logre un setpoint indicado se procede a implementar un control PID

ANALISIS ESTABILIDAD LAZO CERRADO CONTROLADOR PID

Como se pudo observar se logró tener estabilización, pero no se logró el escalón indicado por tal motivo se tienen que implementar además del control PD un control integral el cual eliminara el error en régimen permanente.

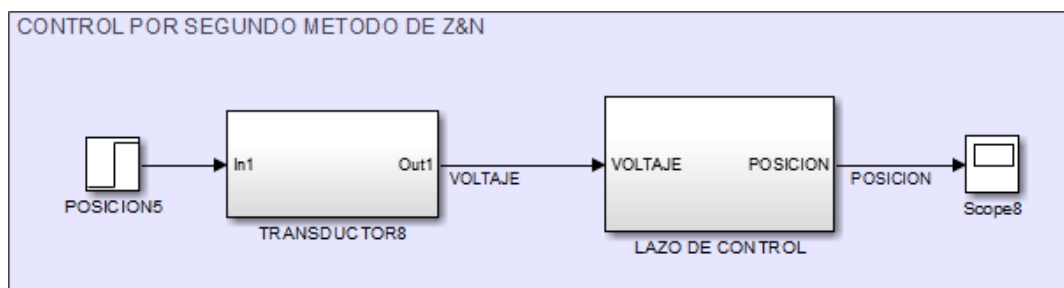


Figura 110 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia

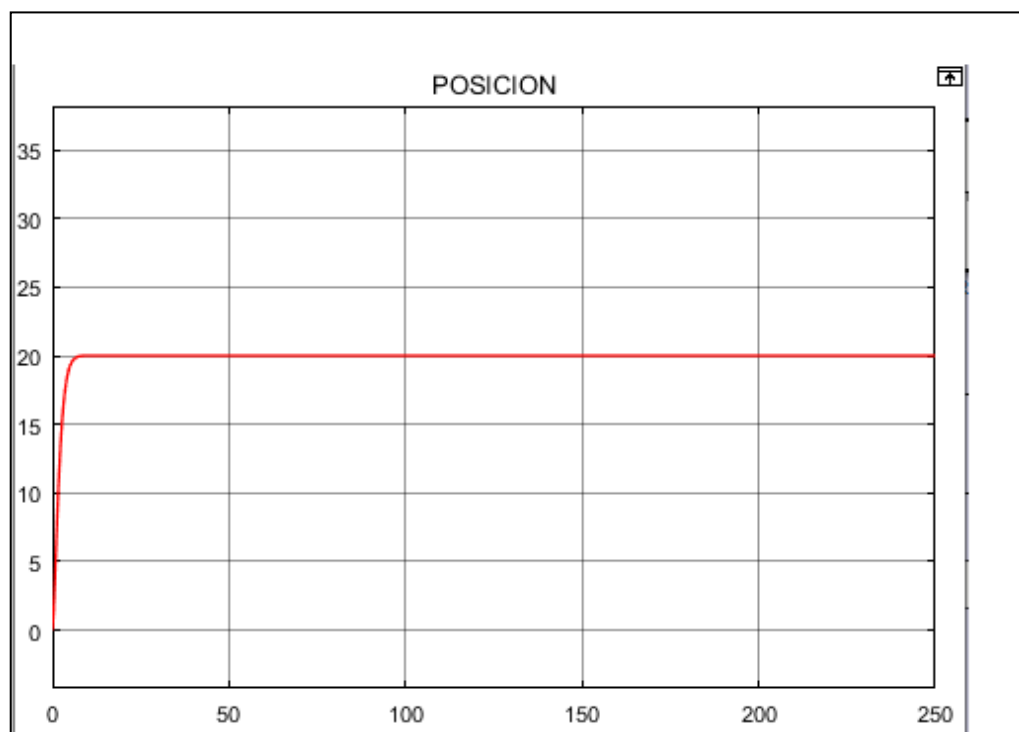


Figura 111 Respuesta controlador PID. Autoría propia

Como se puede observar en la figura 111 con un control PID se logra tener estabilización y llegar al setpoint indicado, por otro lado, puede verse como el error en régimen permanente es nulo. En conclusión, si se usa un controlador de tipo lineal para controlar el sistema, el óptimo para ello es un Proporcional Derivativo Integrativo, es decir, un PID.

9. DISEÑO DE CONTROLADORES PARA EL SISTEMA BALL AND BEAM EN TIEMPO CONTINUO

9.1. DISEÑO DE CONTROLADORES CON SENSOR ULTRASONICO

9.1.1. Controlador PID por segundo método de Z&N

En el segundo método de Z&N, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente.

El lazo de control que representa este tipo de control se observa en la figura 112.

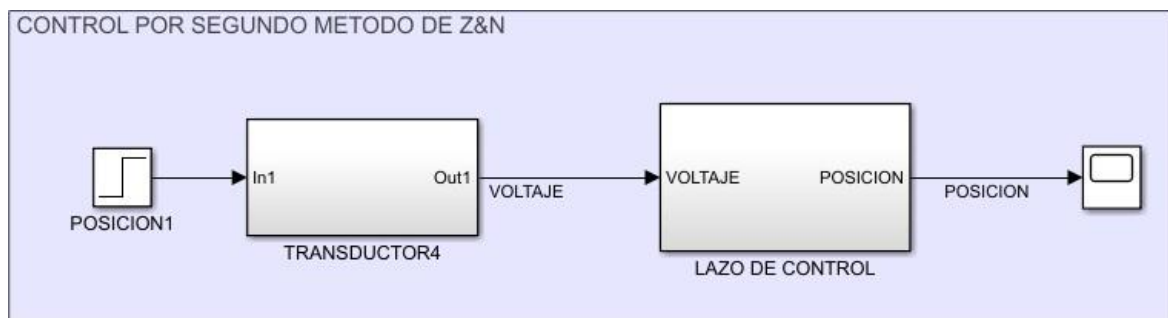


Figura 112 Diagrama de bloques de control por segundo método de Z&N. Autoría propia

Donde el subsistema "lazo de control" es:

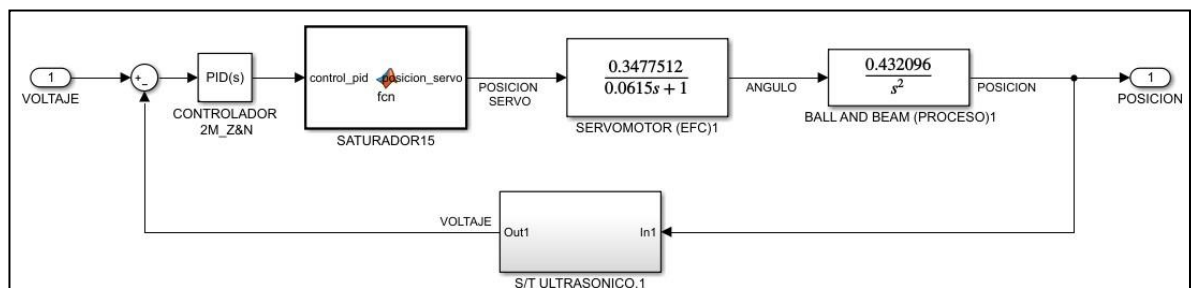


Figura 113 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control". Autoría propia

El K_p se incrementó de 0 hasta un valor de K_{cr} como se muestra en la figura 114:

Source:	internal
Proportional (P):	0.03
Integral (I):	0
Derivative (D):	0
Filter coefficient (N):	100

Figura 114 Valor del parámetro Kcr. Autoría propia

Por lo tanto, la respuesta que se obtiene de este lazo de control se observa en la figura 115:

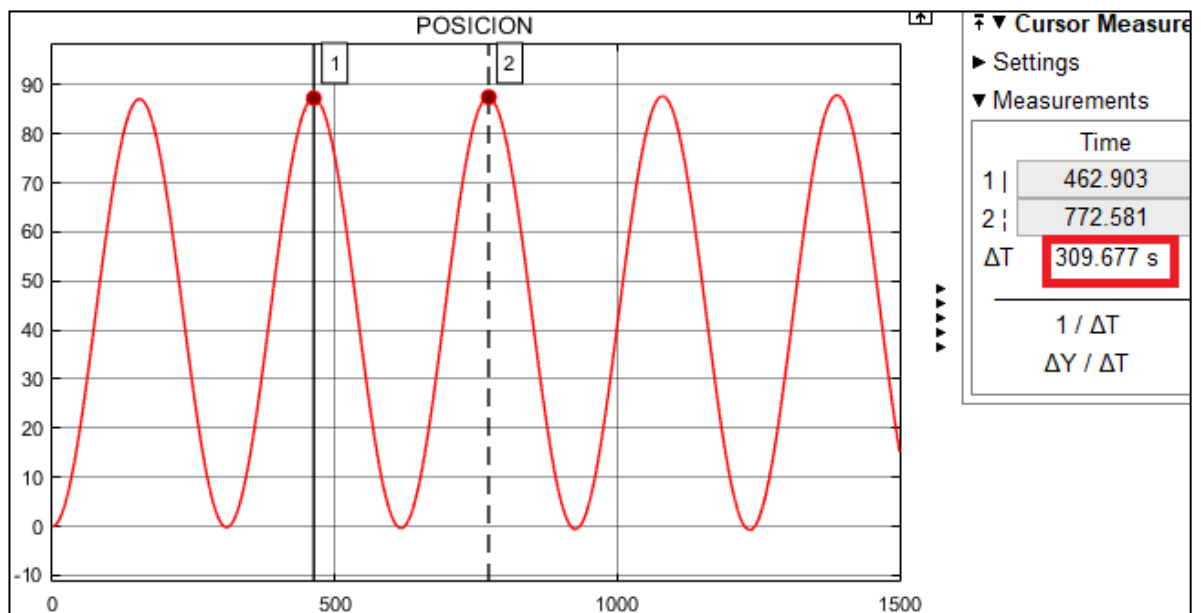


Figura 115 Valor del parámetro Pcr obtenido mediante la respuesta. Autoría propia

Se puede observar en la gráfica anterior (figura 115) el resultado de la constante Pcr que es 309.677. Por lo tanto, como ya fueron obtenidas Kcr y Pcr es posible aplicar el controlador PID por el segundo método de control de Z&N.

Tabla 20 Tipo de controladores mediante el segundo método de Z&N. .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método) [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.571

$$K_p = 0.6 * 0.03 = 0.018$$

$$T_i = 0.5 * 309.677 = 154.8385$$

$$k_i = \frac{0.018}{154.8385} = 0.00011625$$

$$T_d = 0.125 * 309.677 = 38.709625$$

$$K_d = 0.018 * 38.709625 = 0.69677325$$

Se ingresan estos valores en el bloque PID del lazo de control

Source:	internal	
Proportional (P):	0.018	⋮
Integral (I):	0.00011625	⋮
Derivative (D):	0.69677325	⋮
Filter coefficient (N):	100	⋮

Figura 116 valores de parámetros de sintonización PID. Autoría propia

Con una entrada escalón de 20 cm se obtiene la siguiente señal a la salida como se ve en la figura 117:

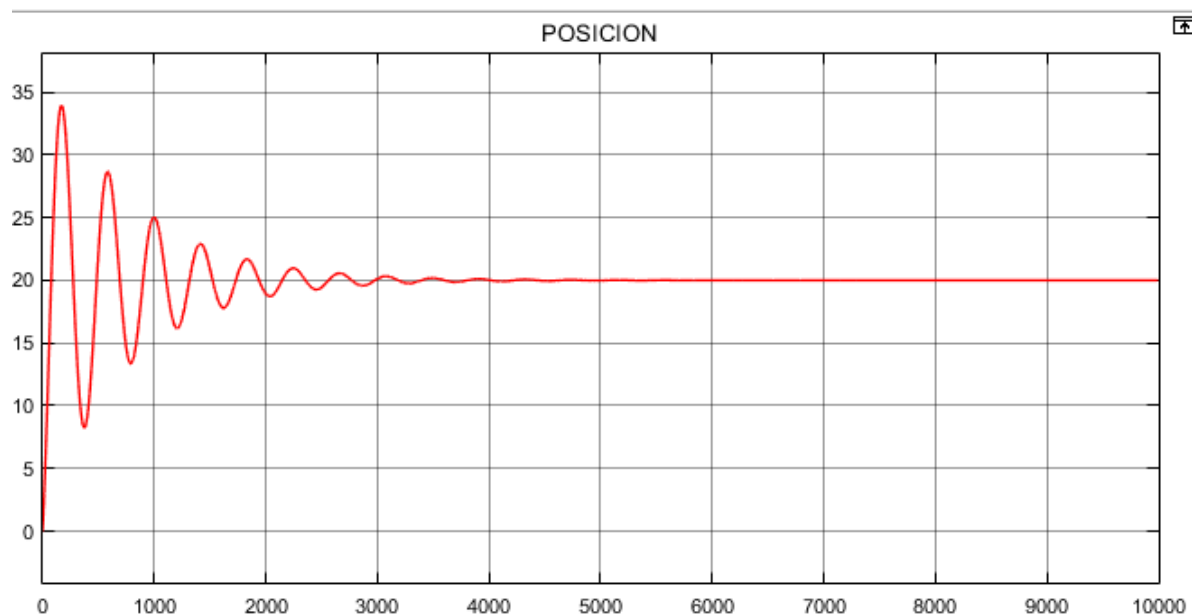


Figura 117 Respuesta obtenida del lazo de control con una entrada escalón de 20 cm.
Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 117 la respuesta converge en la posición deseada, pero con un tiempo bastante amplio, y además en el régimen transitorio el sistema es bastante oscilante, por lo tanto, se puede ver que este método de sintonización no siempre da una buena respuesta, pero se puede utilizar para ajustar el control del sistema de forma empírica, dicho esto se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 21 Ajuste de Parámetros PID. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	0.018	-	Mejoro	-	Mejoro	8	Mejoro	-	Mejoro
Ki	0.00011625	-		-		-		-	
Kd	0.69677325	2		10		-		20	
TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 5	Resultado	Prueba 6	Resultado	Prueba 7	Resultado	Prueba 8	Resultado
Kp	0.018	20	Mejoro	-	Mejoro	50	Mejoro	-	Mejoro
Ki	0.00011625	-		-		-		-	
Kd	0.69677325	-		40		-		110	

La respuesta que se obtiene con estos cambios se observa en la figura 118:

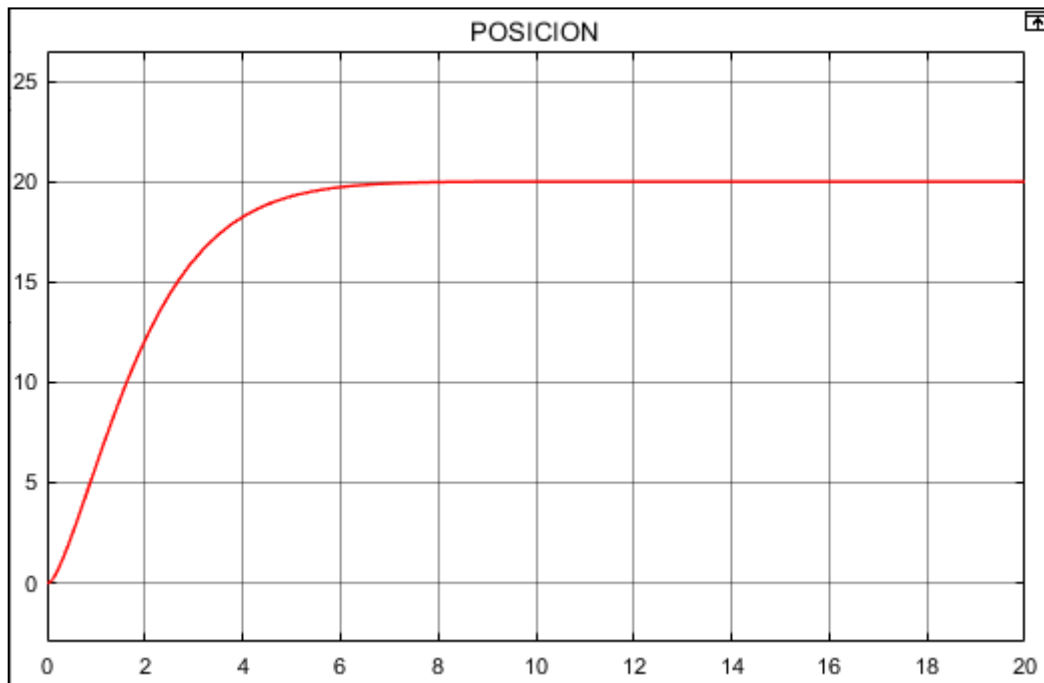


Figura 118 Señal obtenida con ajuste de parámetros PID. Autoría propia

Como se puede ver en la gráfica de la figura 118 la repuesta mejoro notoriamente, ya que el régimen transitorio tiene una excelente mejoría ante las oscilaciones presentadas en la gráfica sin ajustar, y además el tiempo de establecimiento también presenta un cambio satisfactorio.

9.1.2. Controlador PD por método Tuning

El ajuste basado en modelos o el ajuste PD basado en optimización le permite obtener sus parámetros P y D de manera óptima. Sus objetivos de control (rechazo de perturbaciones y seguimiento del punto de ajuste) junto con un modelo de su sistema y las especificaciones de ingeniería del comportamiento de lazo cerrado determinan el conjunto final de parámetros de ajuste.

El ajuste basado en modelos es el método de ajuste PID que le permite trabajar de acuerdo con un proceso de ajuste estructurado que considera tanto el comportamiento del proceso como sus necesidades de control.

El lazo de control que representa este tipo de control es el siguiente:

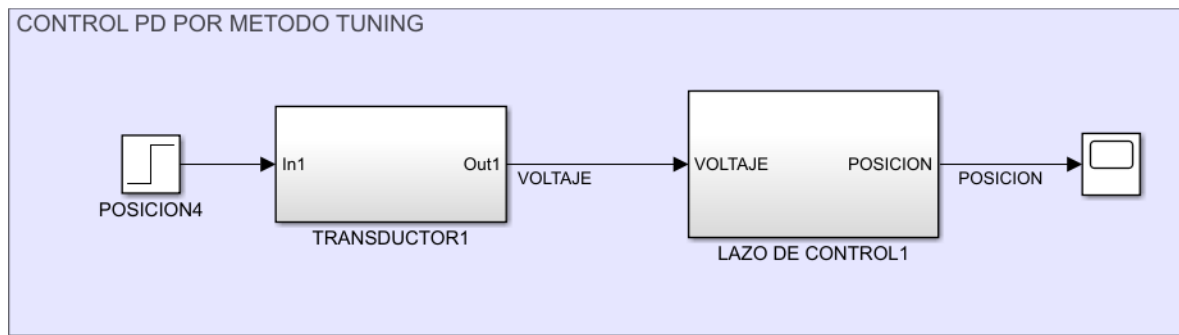


Figura 119 Diagrama de bloques de control por método Tuning. Autoría propia

Donde el subsistema “lazo de control1” es:

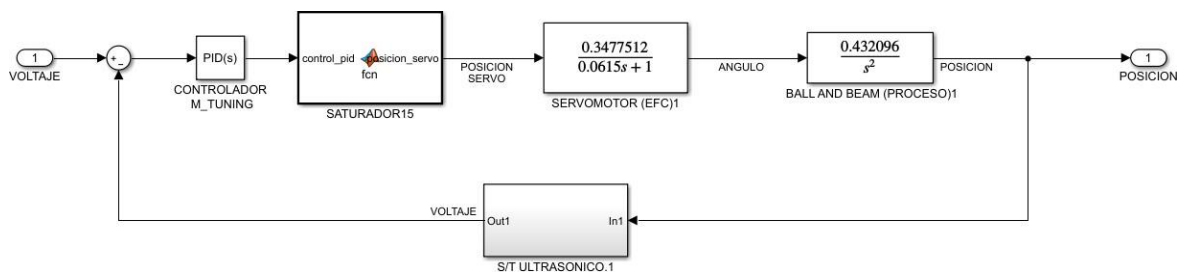


Figura 120 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control1". Autoría propia

Ahora se procede a aplicar el método de Tuning para un controlador PD.

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Derivative (D):

Filter coefficient (N):

Select Tuning Method: Tune...

Figura 121 Aplicación de método Tuning. Autoría propia

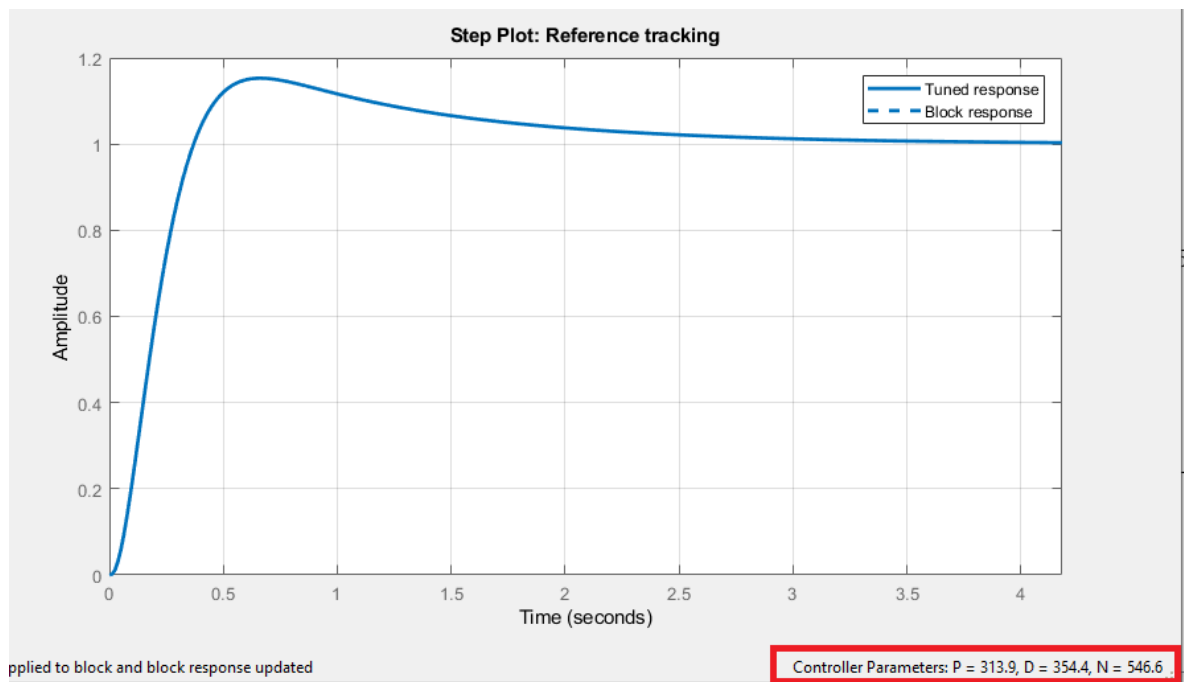


Figura 122 Respuesta aplicando el método Tuning. Autoría propia

El controlador PD queda con los siguientes parámetros

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 313.936599853885

Derivative (D): 354.423906831099

Filter coefficient (N): 546.636967615491

Select Tuning Method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Figura 123 Parámetros del controlador por método Tuning. Autoría propia

La respuesta que se obtiene para un valor deseado de 20 cm con este controlador se observa en la figura 124:

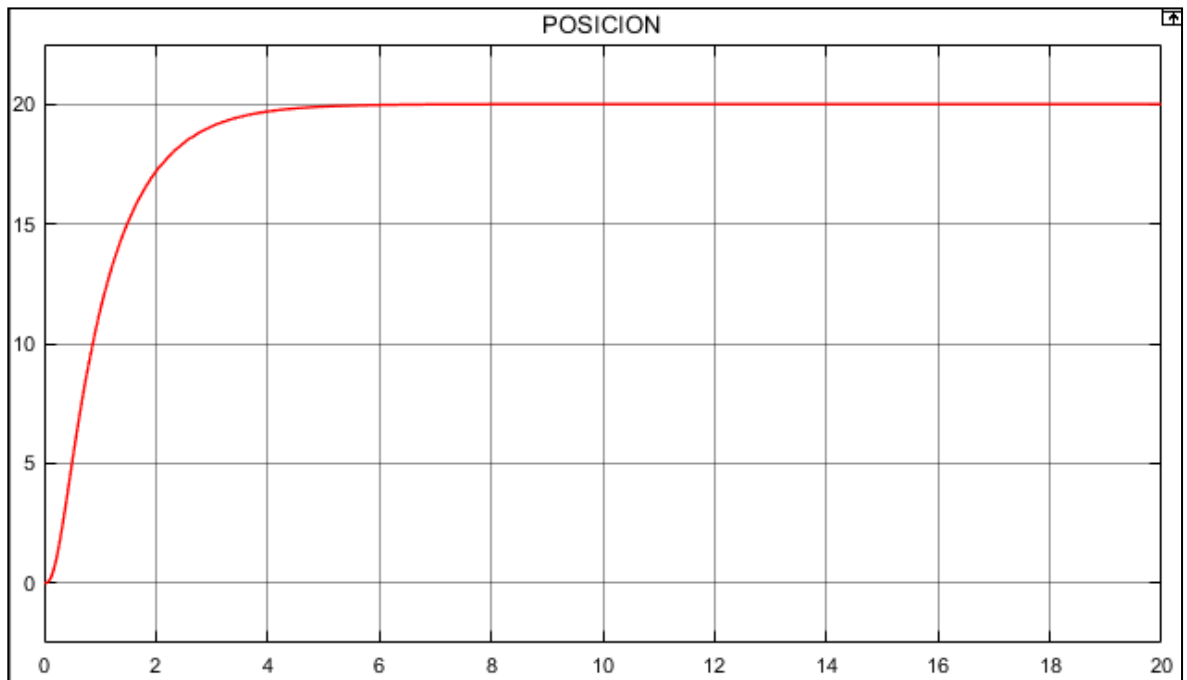


Figura 124 Señal de salida del sistema con el controlador PD por método Tuning. Autoría propia

Observando la gráfica de la figura anterior se puede apreciar que la respuesta obtenida es la deseada, su oscilación es menor del 10% de la consigna y el tiempo de establecimiento es rápido, lo cual hace que este tipo de controlador sea adecuado para el sistema.

9.1.3. Controlador PID por método Tuning

El ajuste basado en modelos o el ajuste PID basado en optimización le permite obtener sus parámetros P, I y D de manera óptima. Sus objetivos de control (rechazo de perturbaciones y seguimiento del punto de ajuste) junto con un modelo de su sistema y las especificaciones de ingeniería del comportamiento de lazo cerrado determinan el conjunto final de parámetros de ajuste.

El ajuste basado en modelos es el método de ajuste PID que le permite trabajar de acuerdo con un proceso de ajuste estructurado que considera tanto el comportamiento del proceso como sus necesidades de control.

El lazo de control que representa este tipo de control es el siguiente:

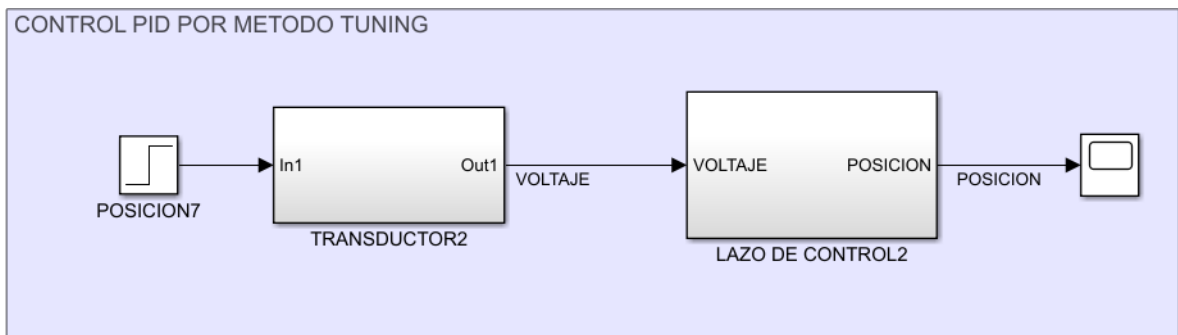


Figura 125 Diagrama de bloques de control PID por método Tuning. Autoría propia

Donde el subsistema “lazo de control2” es:

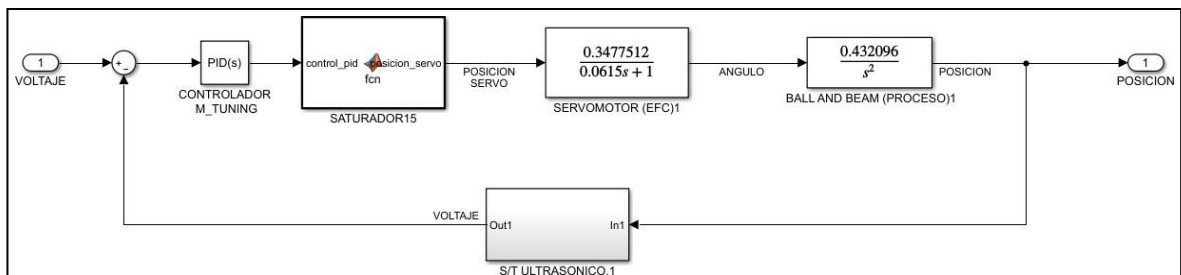


Figura 126 Diagrama de bloques subsistema "Lazo de control2". Autoría propia

Ahora se procede a aplicar el método de Tuning para un controlador PID.

Figura 127 Aplicación de Tune para controlador PID. Autoría propia

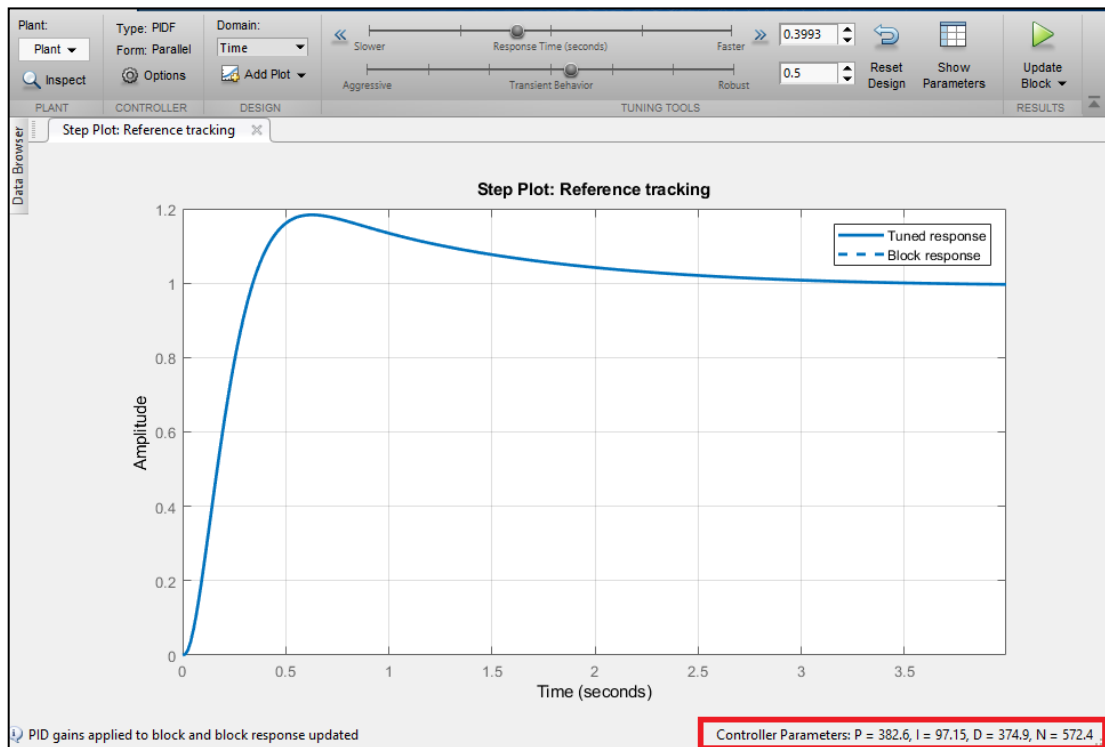


Figura 128 Repuesta obtenida al tuncar el controlador. Autoría propia

El controlador PID queda con los siguientes parámetros

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):

Derivative (D):

Filter coefficient (N):

Select Tuning Method:

Figura 129 Parámetros del controlador PID por método Tuning. Autoría propia

La respuesta que se obtiene para un valor deseado de 20 cm con este controlador se observa en la figura 130:

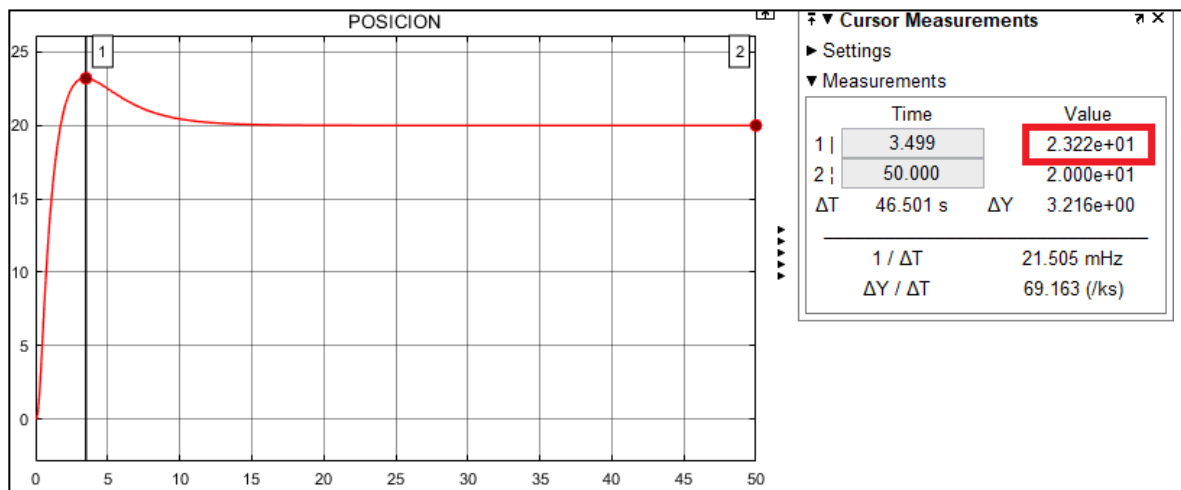


Figura 130 Señal de salida de lazo de control con controlador PID por método Tuning. Autoría propia

Observando la gráfica de la figura anterior se puede apreciar que la respuesta obtenida es la deseada, pero en comparación con la del controlador PD por Tuning presenta una oscilación mayor al 10% de la consigna, esto se debe a que la constante integral tiene una gran influencia en el controlador y al ser un factor que es acumulativo tarda tiempo en hacerse pequeña generando que el sistema presente este sobrepaso. Para solucionar este inconveniente se aplicó ANTI-WINDUP para mitigar los efectos negativos de la acción integral.

$$t_w = \frac{1}{\sqrt{t_i * t_d}} = 0.50903 \quad (40)$$

En la siguiente figura se puede observar el diagrama de bloques del lazo de control con ANTI-WINDUP

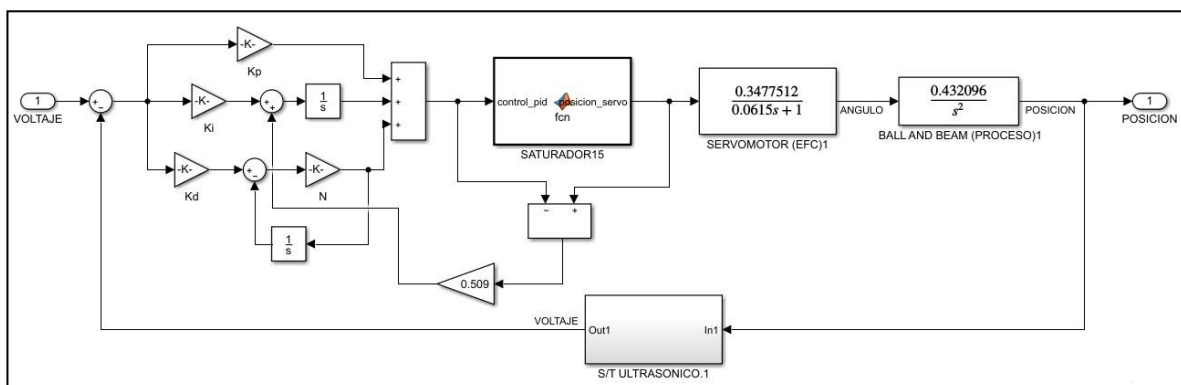


Figura 131 Controlador PID con Anti-Windup. Autoría propia

La respuesta del sistema obtenida (figura 132) en comparación a la respuesta sin Anti-Windup (figura 130) se puede observar que el sobrepaso disminuyó notablemente y el tiempo de establecimiento es un poco más rápido.

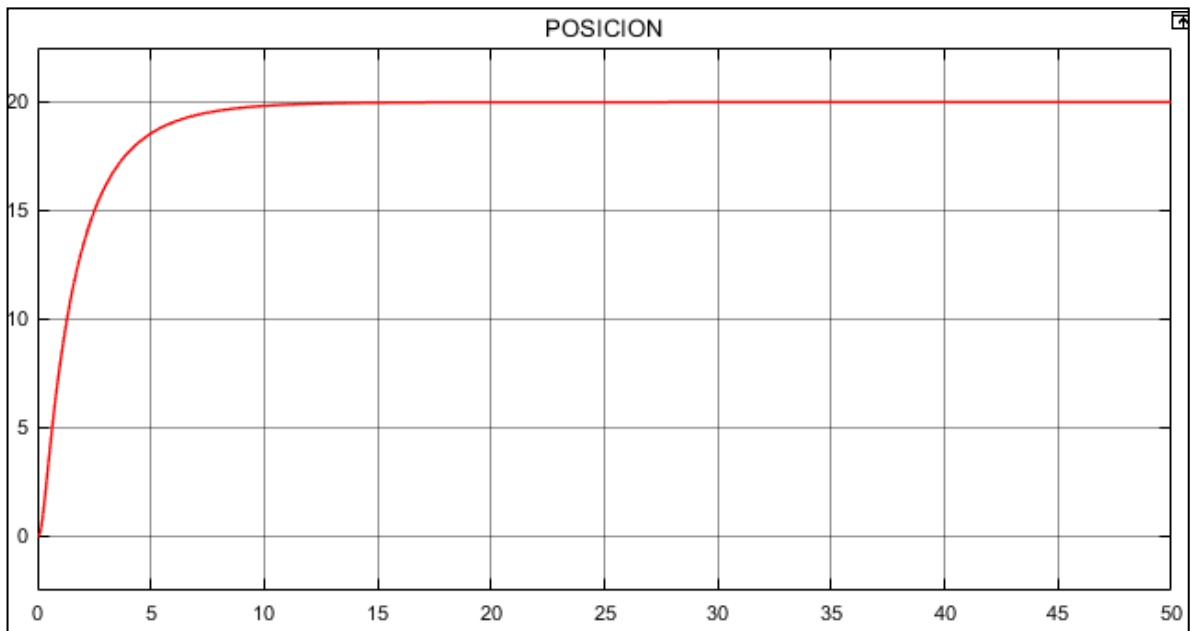


Figura 132 Respuesta del sistema al aplicar Anti-Windup. Autoría propia

9.1.4. Validación de la metodología implementada para controladores obtenidos.

Para el proceso de validación se tuvieron en cuenta los márgenes de respuesta del sistema ante los diferentes tipos de control (PID segundo método Z&N, PD por Tuning y PID por Tuning) para el régimen transitorio, así como también un estudio para el régimen estable.

Los márgenes de respuesta en el régimen transitorio tenidos en cuenta fueron tiempo de retardo (t_d), tiempo de levantamiento (t_r), máximo pico (mp), tiempo pico (t_p) y tiempo de establecimiento (t_s) ya que es un sistema con entrada de tipo escalón unitario. Estos 5 márgenes se definen como:

- Tiempo de retardo: tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez al 50% del valor final.
- Tiempo de levantamiento: tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%.
- Máximo pico: Es el valor pico máximo de la curva de respuesta
- Tiempo pico: Es el tiempo que tarda el sistema en llegar al máximo pico
- Tiempo de establecimiento: tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado

por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

El estudio se realizó con el fin de conocer la respuesta del sistema ante los diferentes controladores, así como también detallar más a fondo la respuesta en estado estable, mediante un indicador como lo es el error promedio. En general se hicieron 9 experimentos por software, los cuales se señalan a continuación:

- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning ante una perturbación.

9.1.4.1. Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control

9.1.4.1.1. Puesta del sistema de control PID por segundo método de Z&N en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 40 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

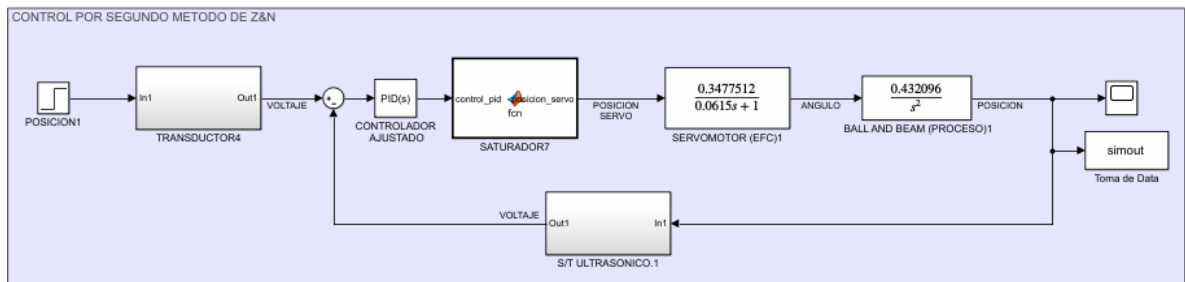


Figura 133 Diagrama de bloque de lazo cerrado con control PID clásico. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema.

9.1.4.1.2. Puesta del sistema de control PD por Tuning en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 40 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

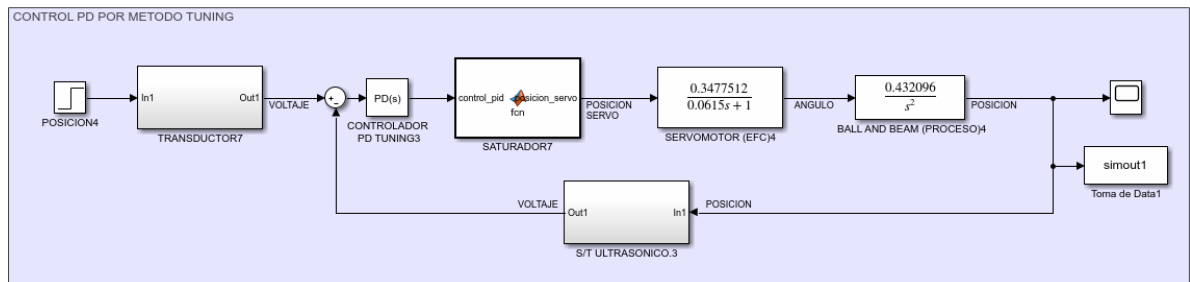


Figura 134 Diagrama de bloque para controlador PID para análisis. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 14 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 16 es retirada del sistema.

9.1.4.1.3. Puesta del sistema de control PID Tuning en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 40 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

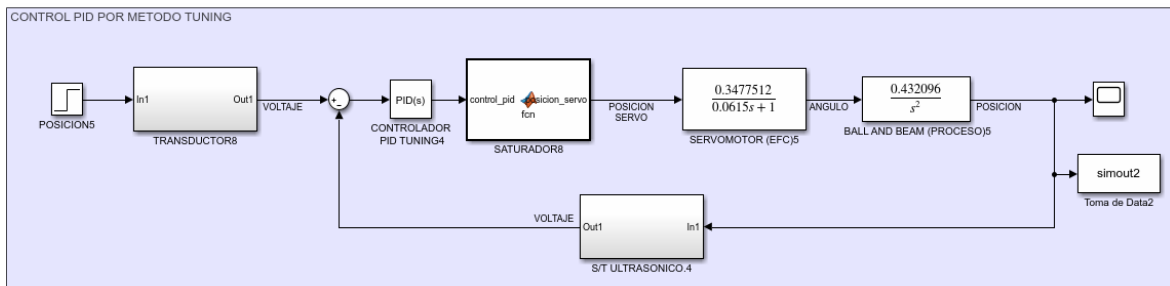


Figura 135 Diagrama de bloque para controlador PID. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 14 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 16 es retirada del sistema.

9.1.4.2. Validación estadística de los resultados

9.1.4.2.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por segundo método Z&N

- Condiciones normales

En la figura 136 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

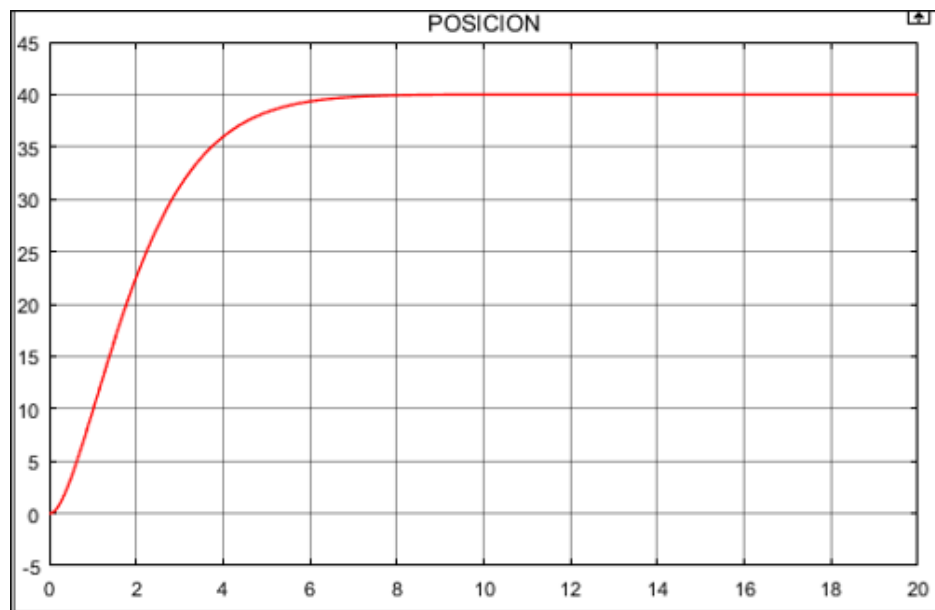


Figura 136 Respuesta del sistema con controlador PID por segundo método de Z&N. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

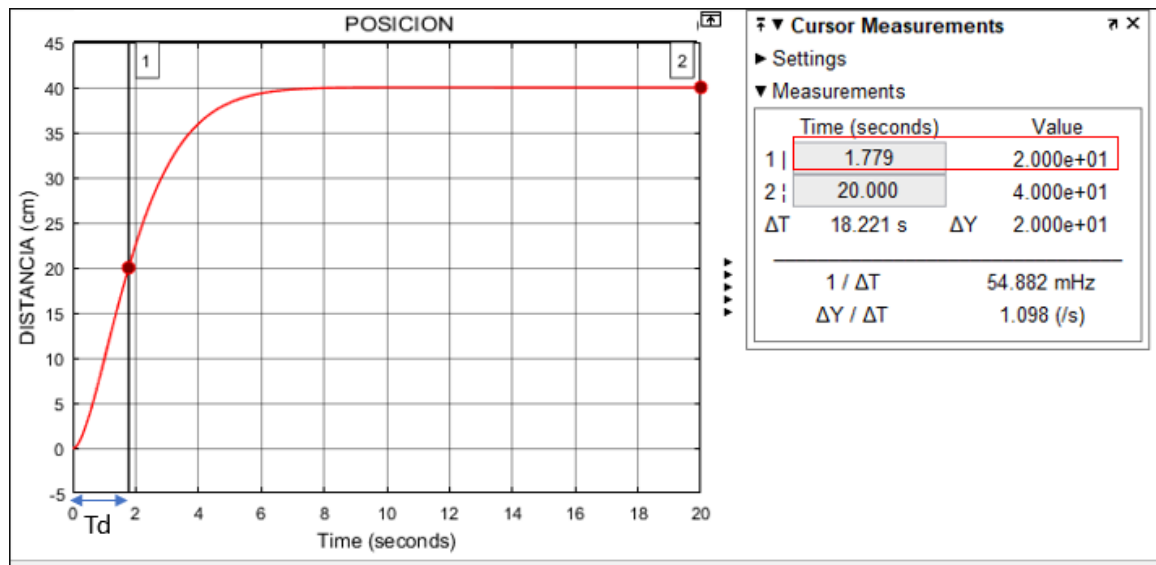


Figura 137 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.779 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

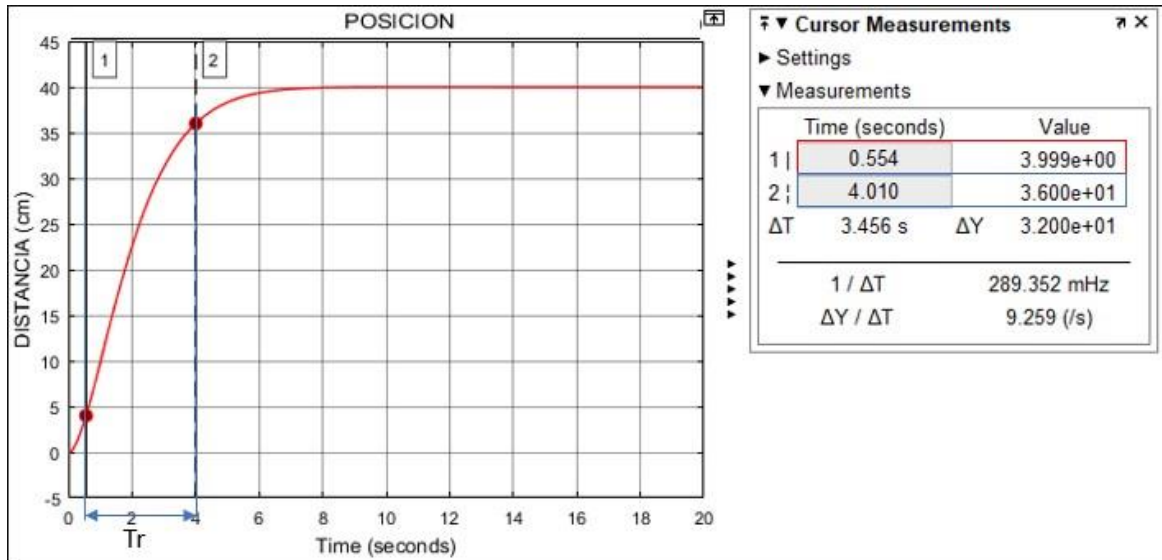


Figura 138 Respuesta del controlador en tiempos del 10% y 90%

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 4.010 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.554 segundos

$Tr = 4.030 - 0.565 = 3.456$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.8

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite

Inferior.

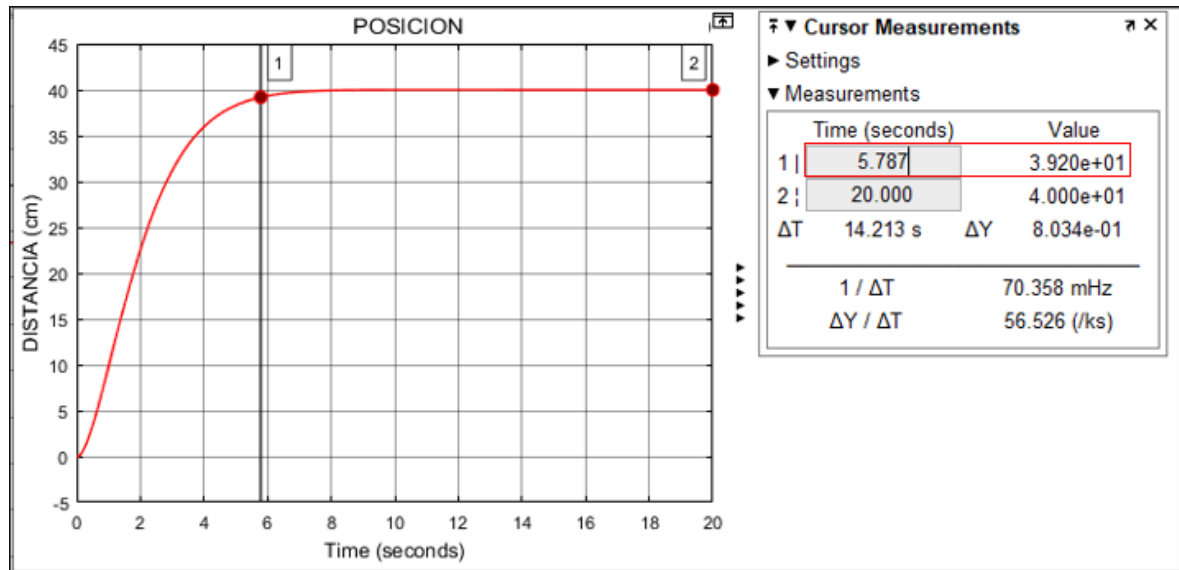


Figura 139 Tiempo de establecimiento 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.787 segundos

- Ruido

En la figura 140 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

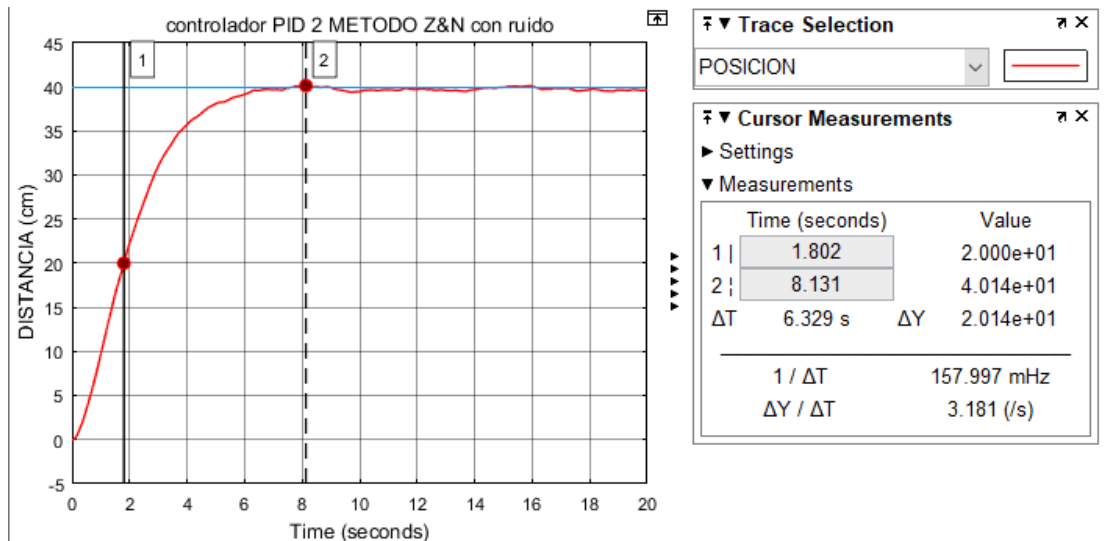


Figura 140 Respuesta del sistema controlador PID 2 METODO Z&N con ruido

Valor final (VF)= 40.14 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.07 cm

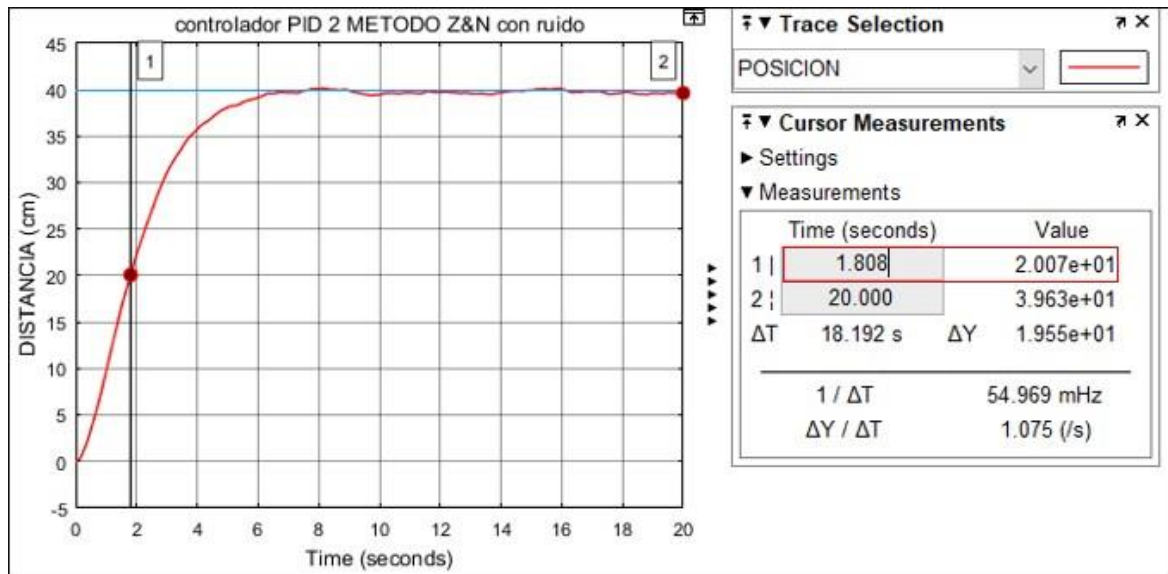


Figura 141 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N con ruido.
Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =1.808 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36.12 cm

10% de VF= 4.014 cm

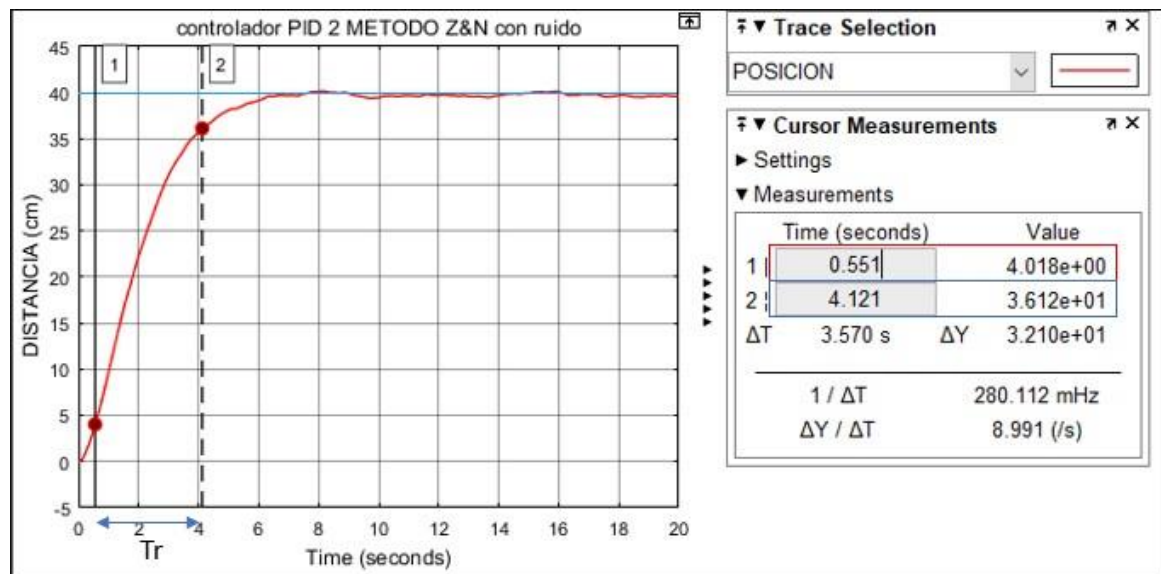


Figura 142 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 4.121 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.551 segundos

$Tr = 4.121 - 0.551 = 3.57$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8028$$

De esta manera el rango es 40.9 para el límite superior y 39.33 para el límite Inferior.

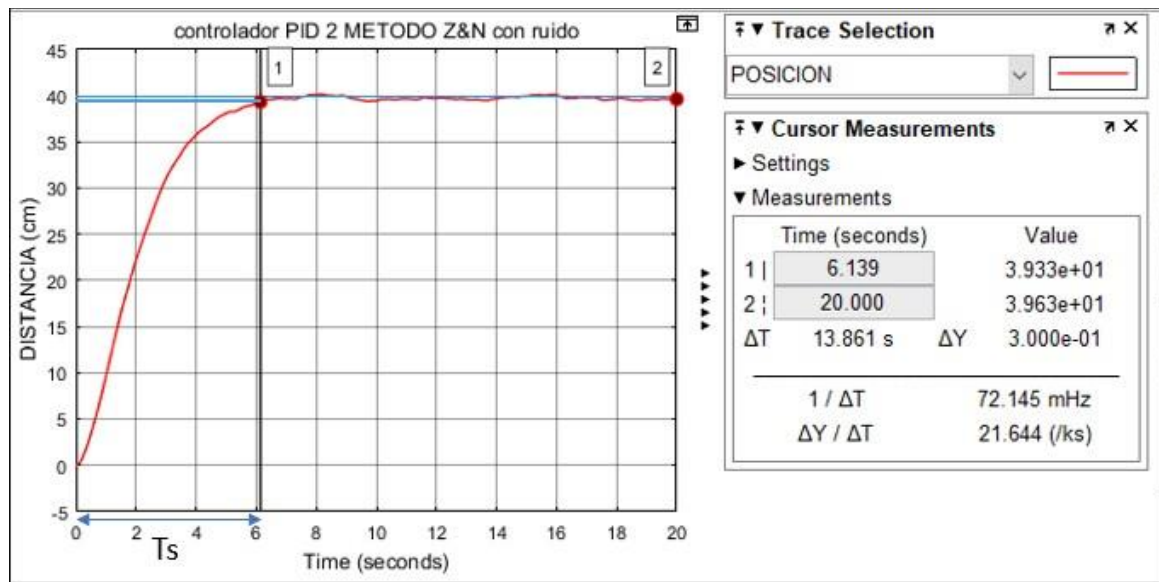


Figura 143 Tiempo de establecimiento 98% con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 6.139 segundos

9.1.4.2.2. Estudio del régimen estable del sistema de control PID por segundo método Z&N

- Ruido

En la figura 144 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 146 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

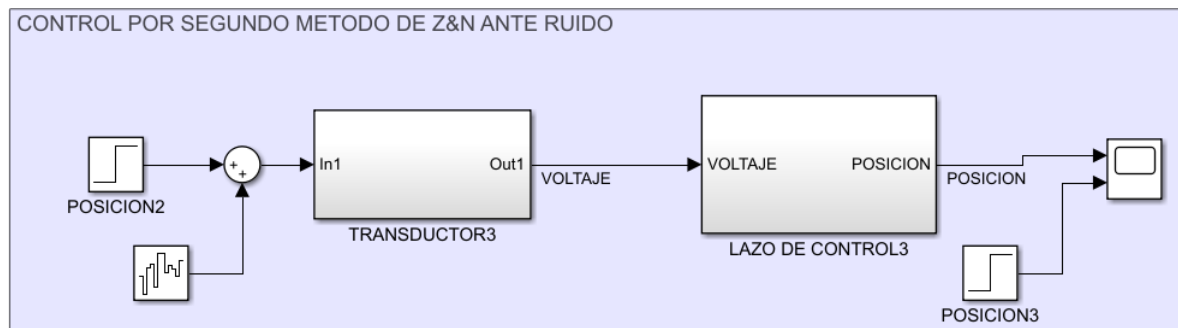


Figura 144 Diagrama de bloques de control por 2º método Z&N ante ruido. Autoría propia

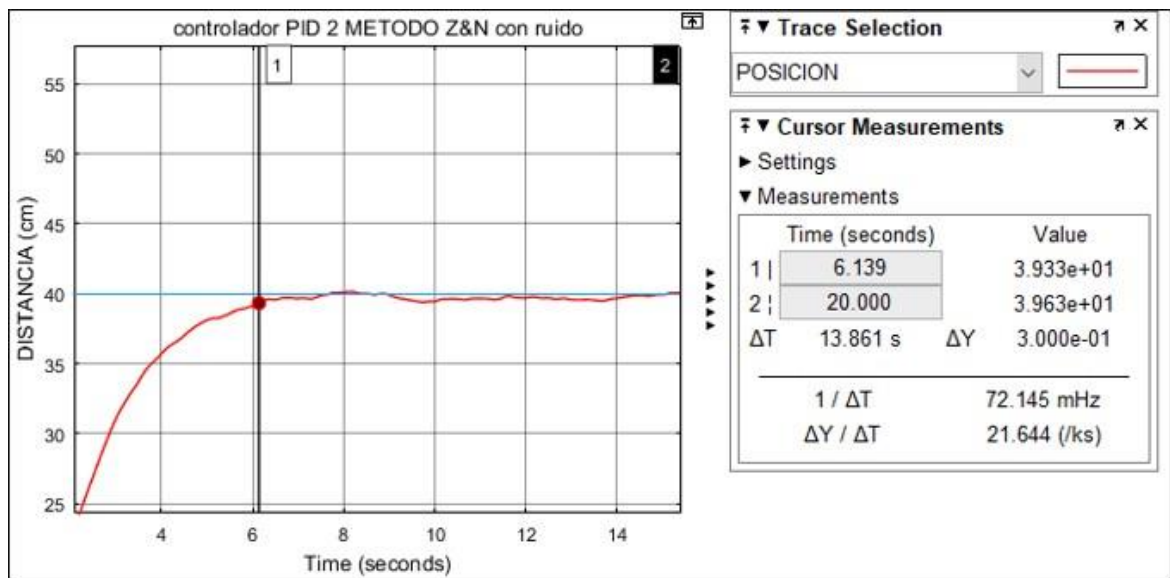


Figura 145 respuesta del sistema con control por 2° método Z&N ante ruido. Autoría propia

Como se observa en la figura 145 el controlador no atenúa en un 100% el ruido, pero esta trata de que la respuesta del sistema tenga un rango de convergencia entre 39.63-40, lo cual quiere decir que hay una tolerancia de ± 0.37 cm.

- Perturbación

En la figura 146 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 147 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

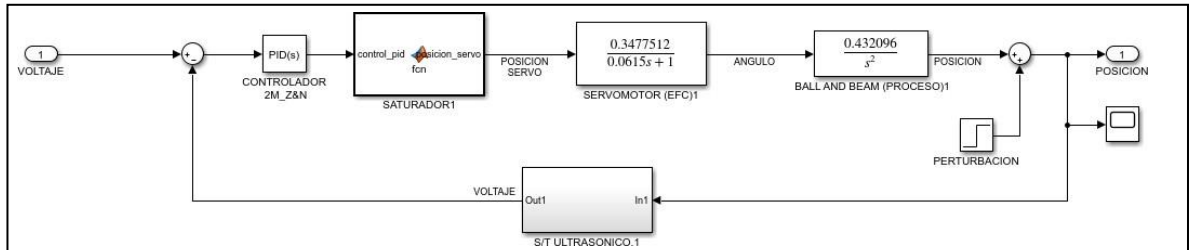
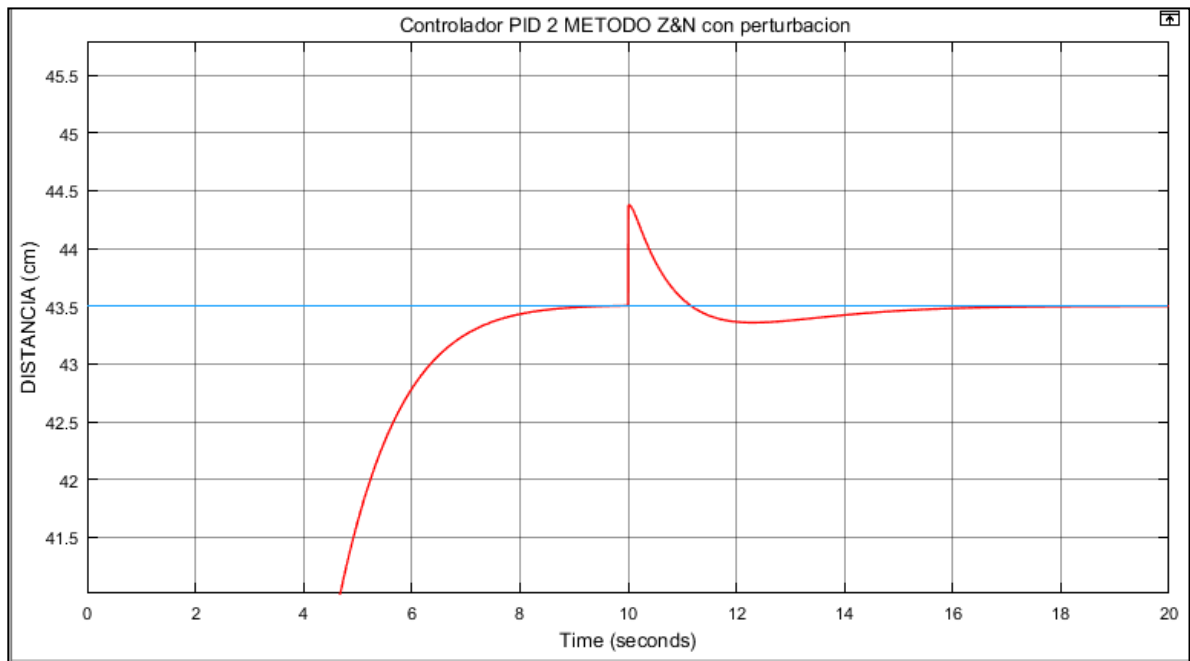


Figura 146 Diagrama de bloques del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia



**Figura 147 respuesta del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N.
Autoría propia**

Como se observa en la figura 147 en el instante de tiempo 10 se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 0.87 cm llevando el nivel del tanque a un valor de 40 cm y permaneciendo en el sistema durante 7 segundos, en este transcurso de tiempo el controlador logra reducir la perturbación un 100% llevando el sistema a un valor de 40 cm por lo que en definitiva logro compensar el valor de la perturbación.

9.1.4.2.3. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning

- Condiciones normales

En la figura 148 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

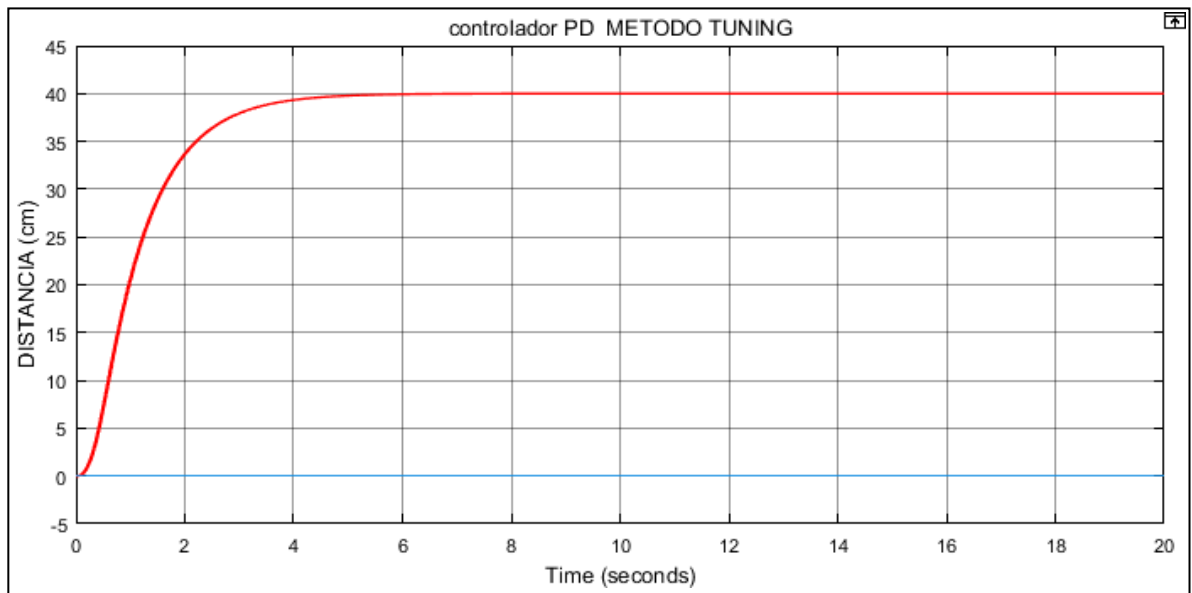


Figura 148 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

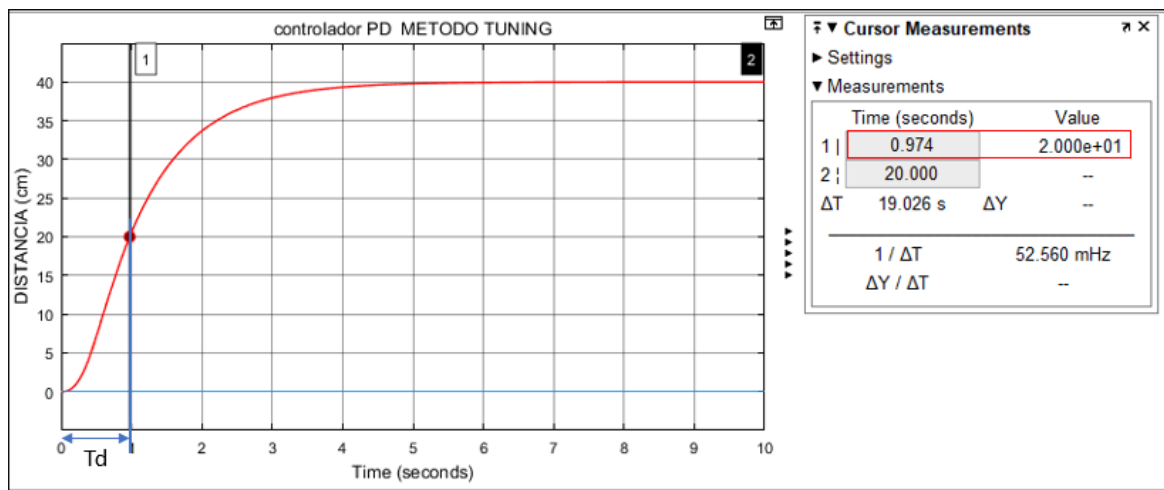


Figura 149 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =0.974 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

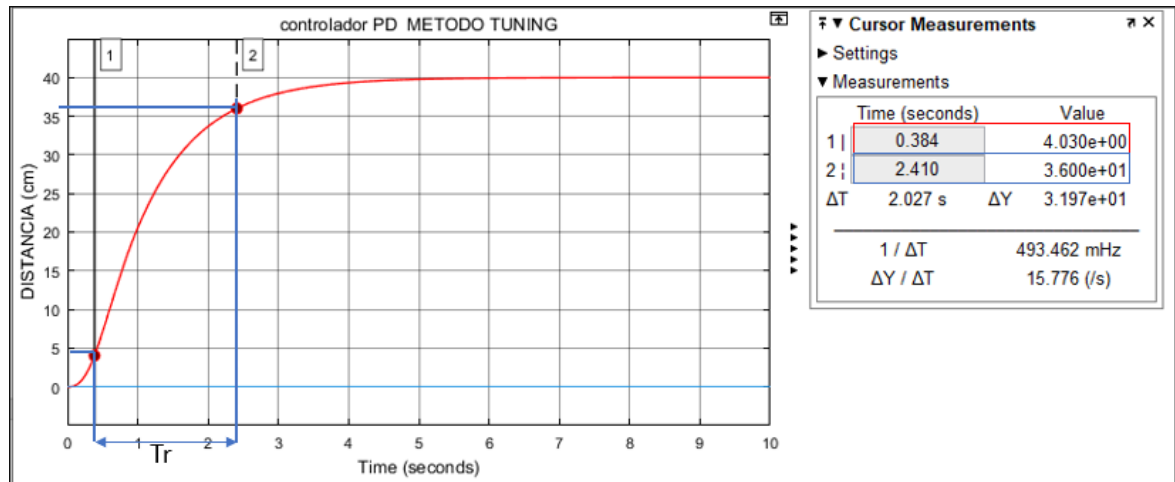


Figura 150 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.410 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.384 segundos

$T_r = 2.410 - 0.384 = 2.026$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.8

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

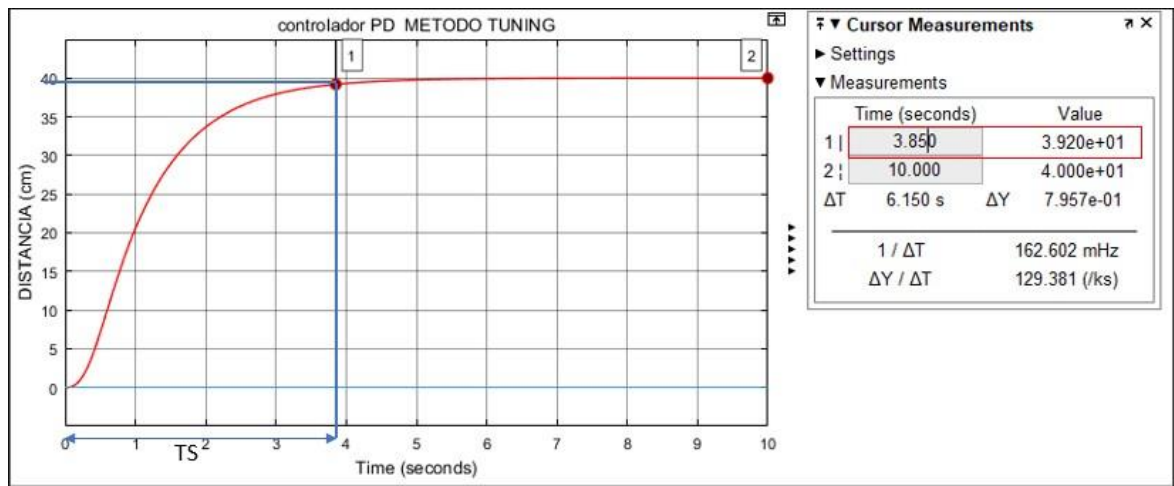


Figura 151 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 3.850 segundos

- Ruido

En la figura 153 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

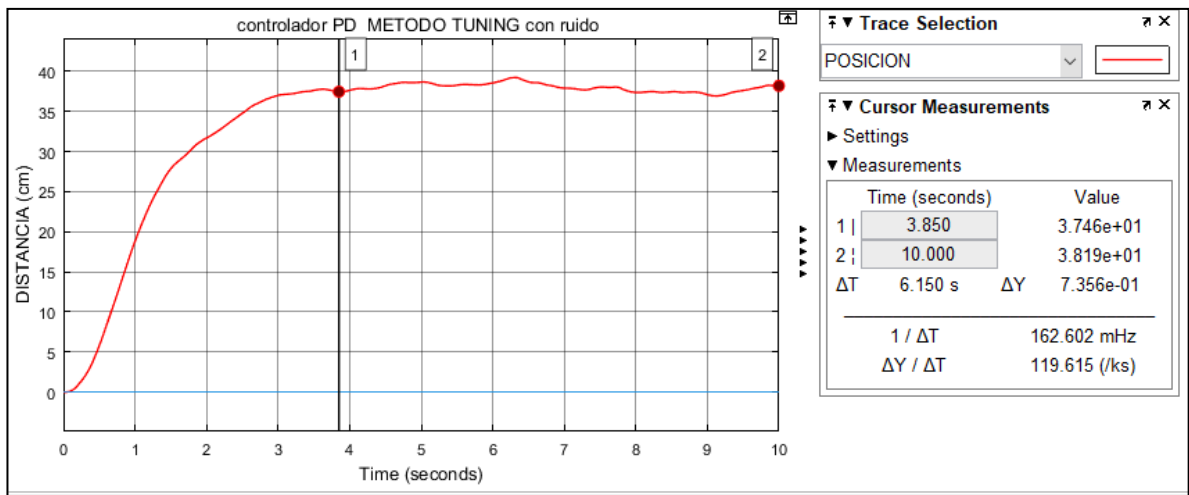


Figura 152 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 38.2 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 19.1 cm

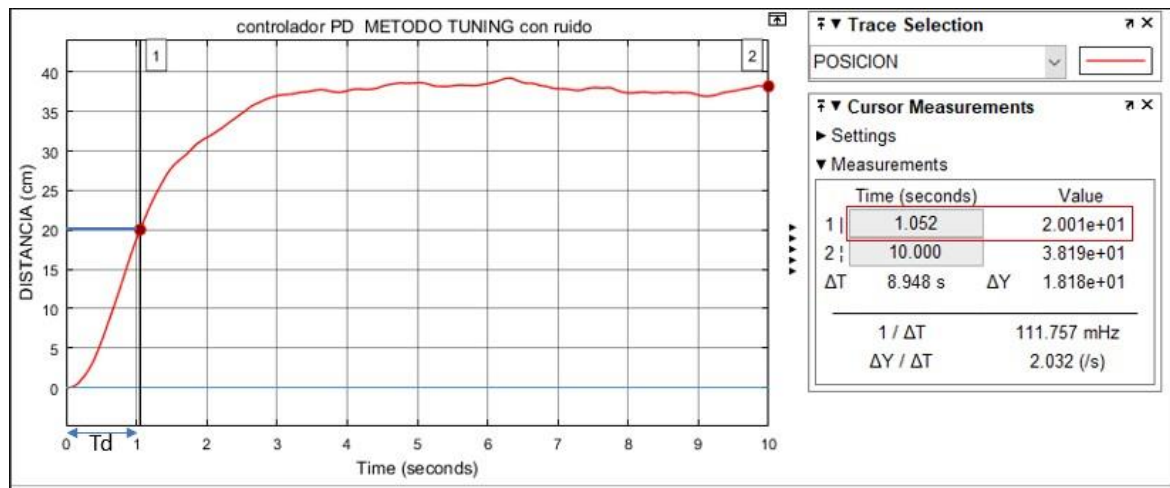


Figura 153 tiempo al 50% del valor final. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.052 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 34.38 cm

10% de VF= 3.82 cm

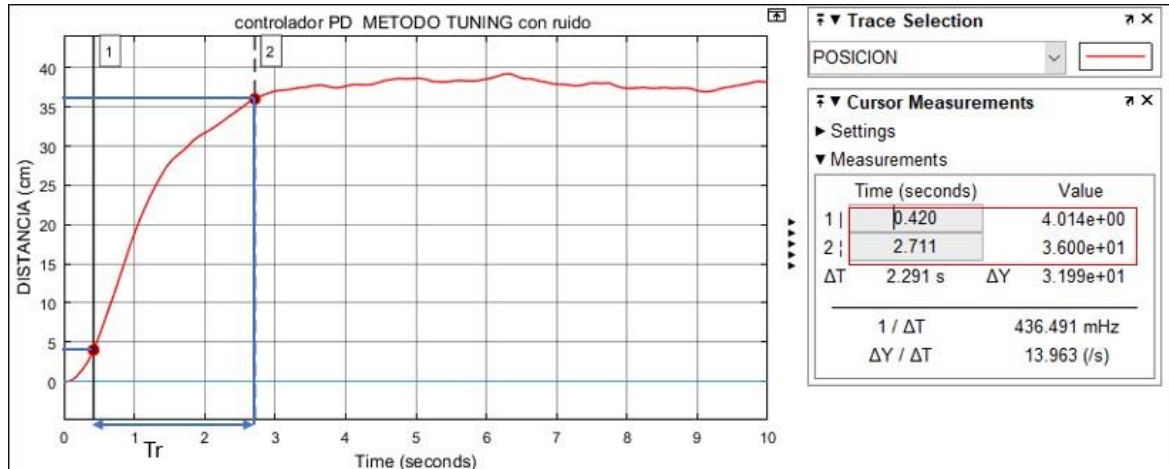


Figura 154 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.611 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.320 segundos

$T_r = 2.611 - 0.320 = 2.291$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.764$$

De esta manera el rango es 39 para el límite superior y 37.42 para el límite Inferior.

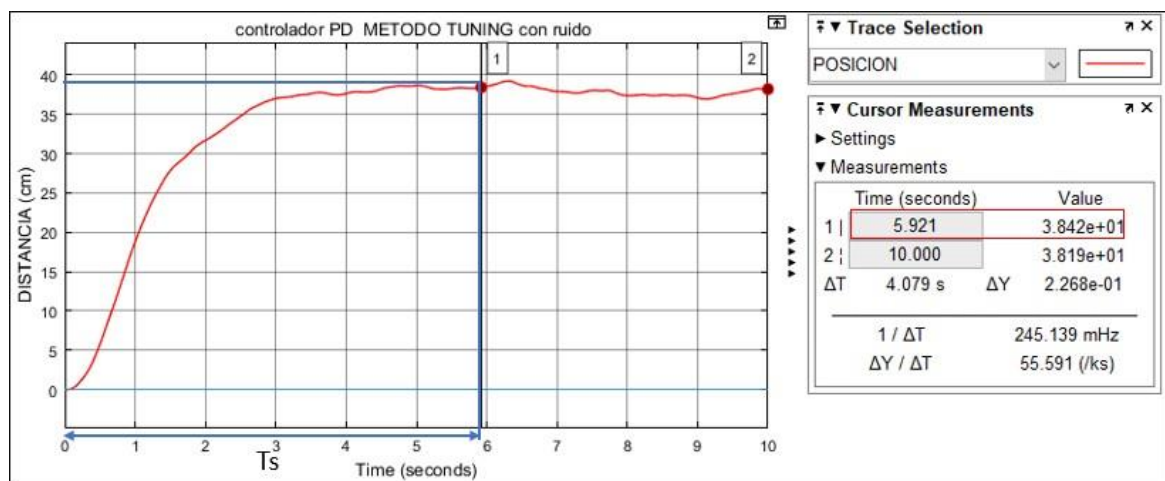


Figura 155 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.921 segundos

9.1.4.2.4. Estudio del régimen estable del sistema de control PD por Tuning

- Condiciones normales

En la figura 156 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

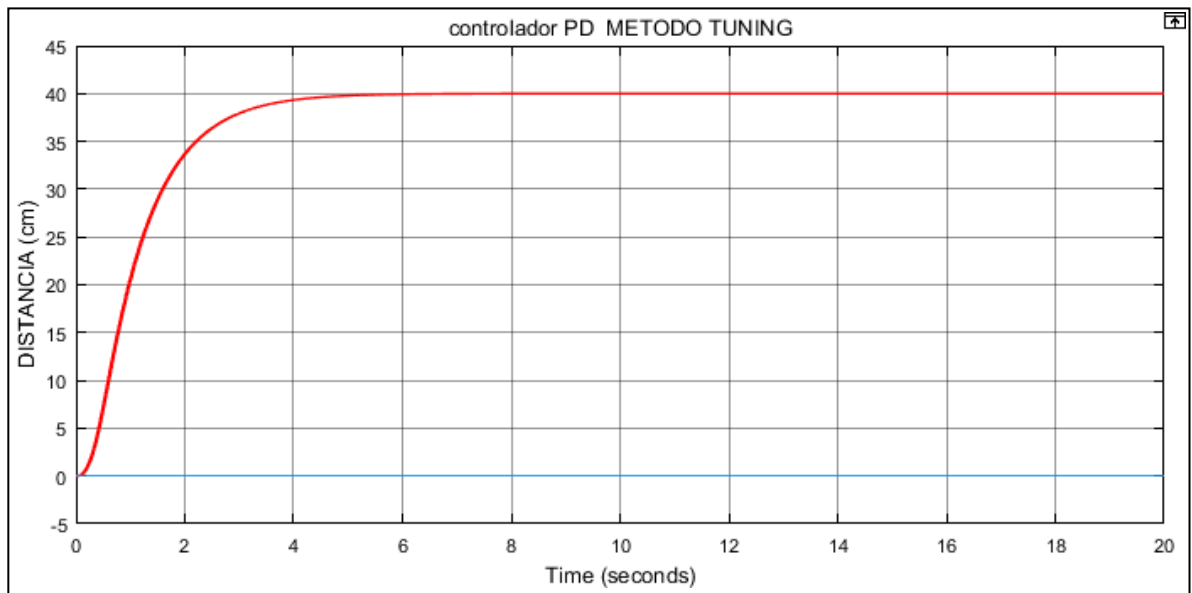


Figura 156 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

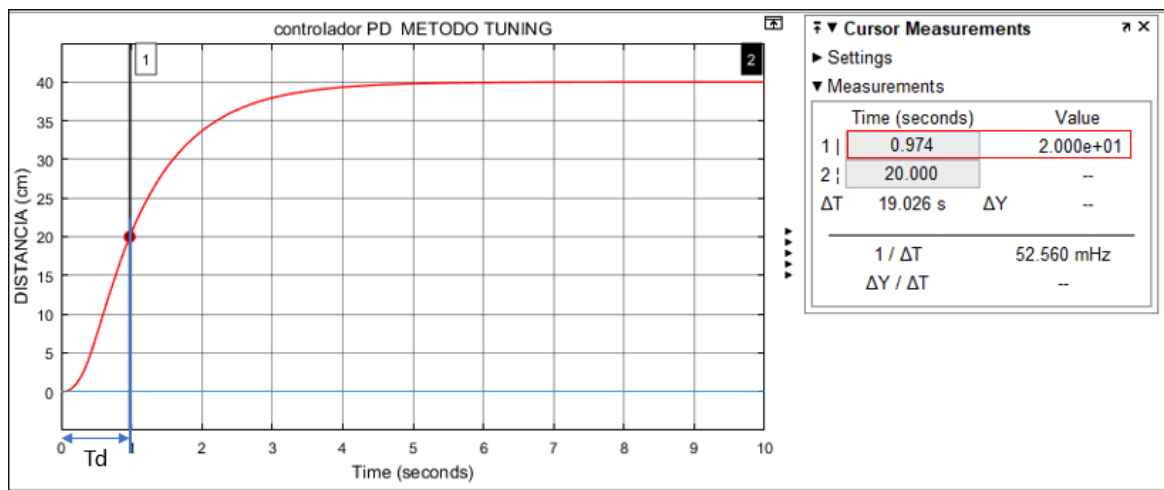


Figura 157 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =0.974 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

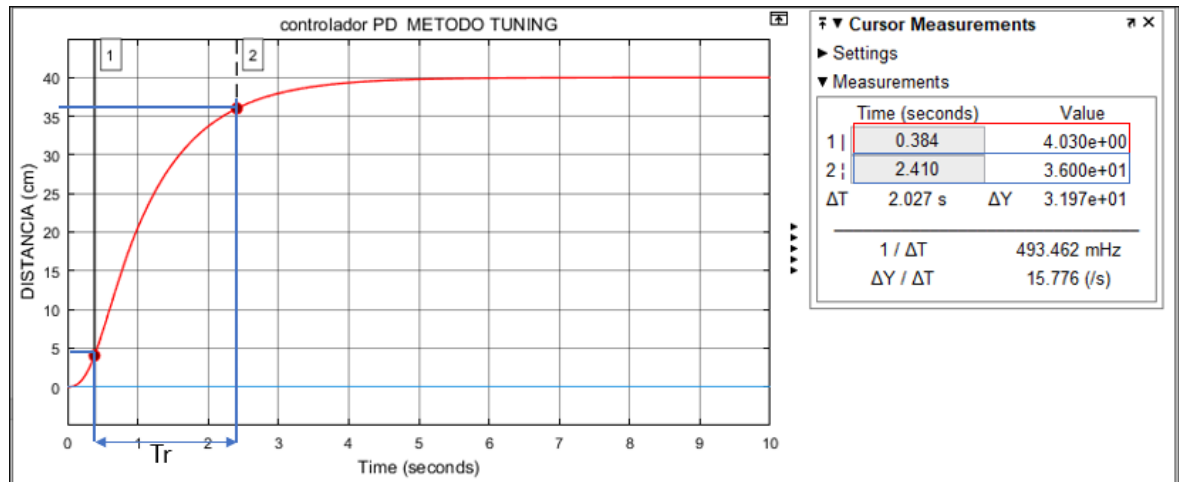


Figura 158 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.410 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.384 segundos

$Tr = 2.410 - 0.384 = 2.026$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.8

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

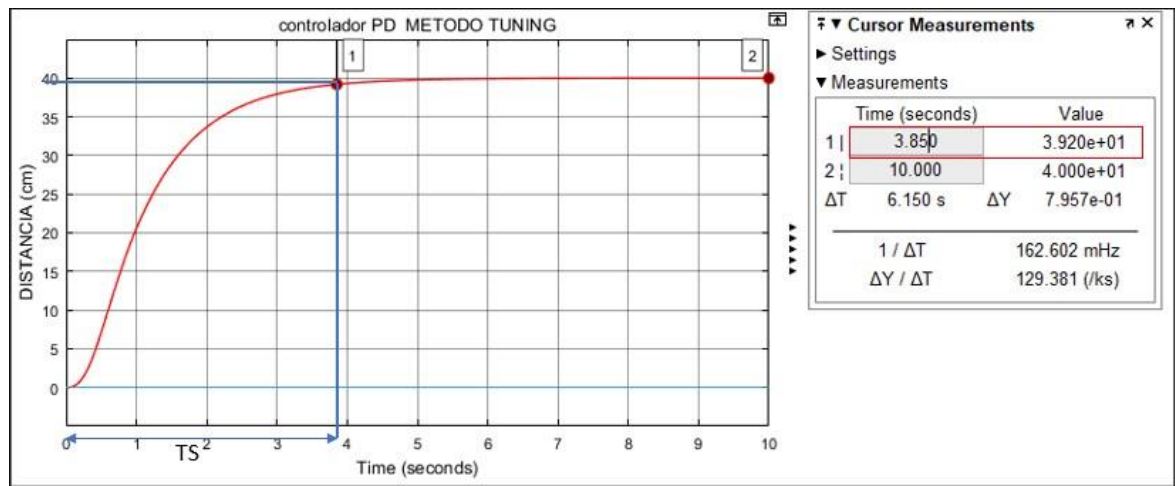


Figura 159 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 3.850 segundos

- Ruido

En la figura 160 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

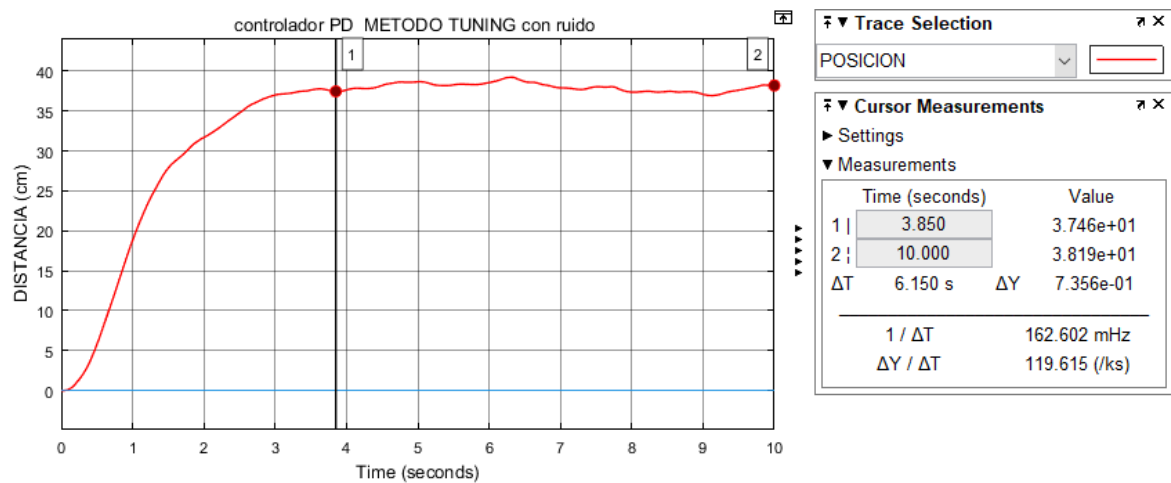


Figura 160 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido

Valor final (VF)= 38.2 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 19.1 cm

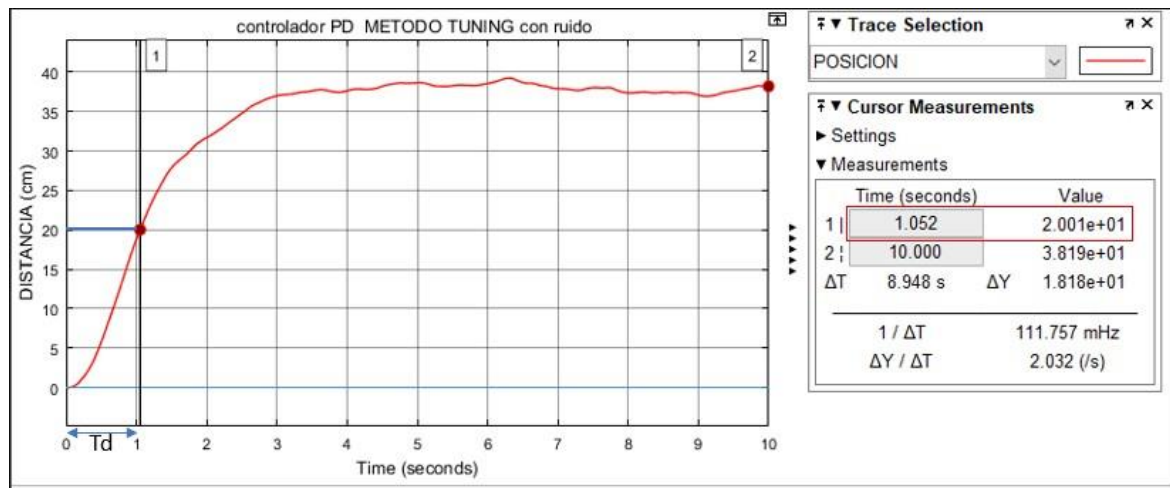


Figura 161 Valor del tiempo de retardo con controlador PD. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.052 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 34.38 cm

10% de VF= 3.82 cm

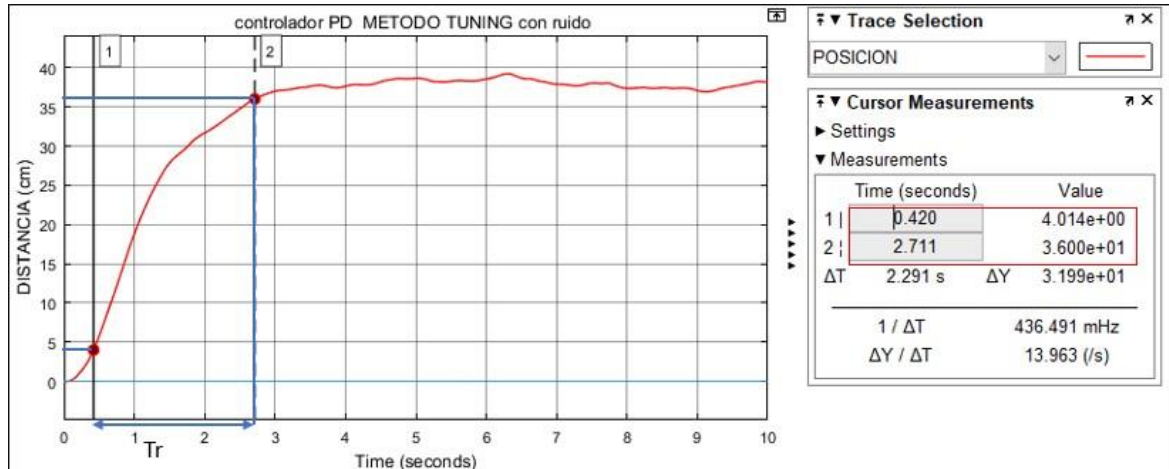


Figura 162 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.611 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.320 segundos

$Tr = 2.611 - 0.320 = 2.291$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.764$$

De esta manera el rango es 39 para el límite superior y 37.42 para el límite Inferior.

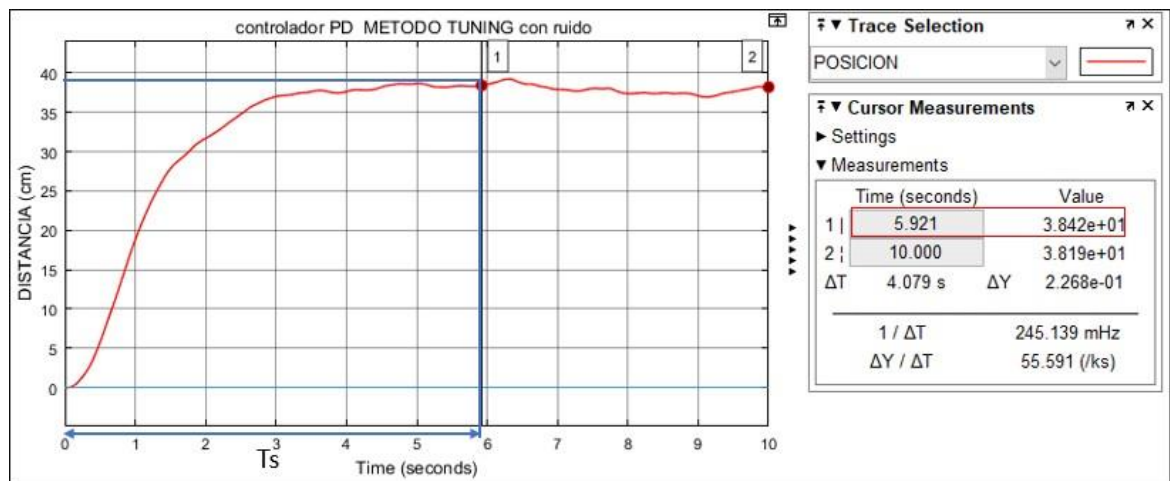


Figura 163 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.921 segundos

9.1.4.2.5. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning

- Ruido

En la figura 164 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 166 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

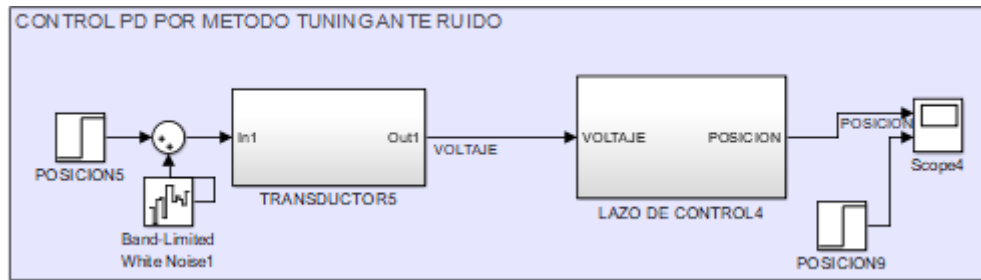


Figura 164 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido

se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

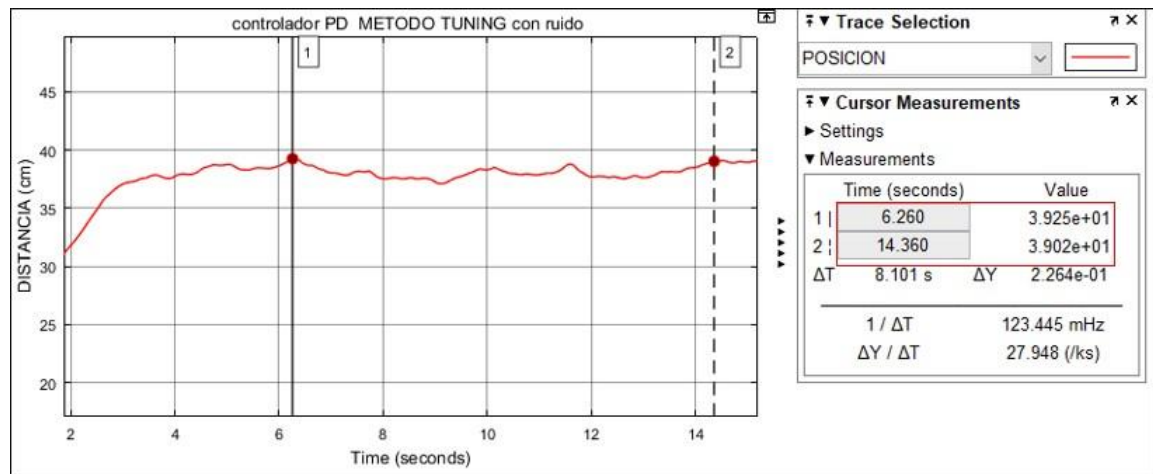


Figura 165 Respuesta estable controlador método tuning. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene no logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PD no es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 166 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la-figura 167 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

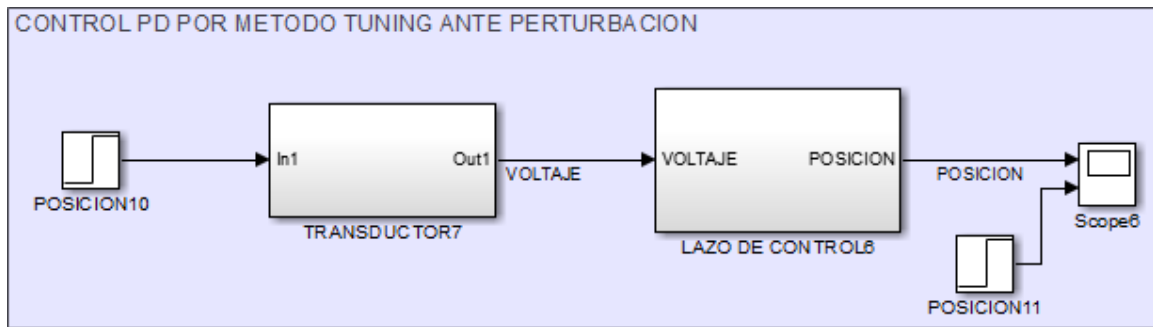


Figura 166 diagrama de bloques control PD método tuning perturbación. Autoría propia
 Como se observa en la figura 167 el controlador atenúa en un 100% la perturbación

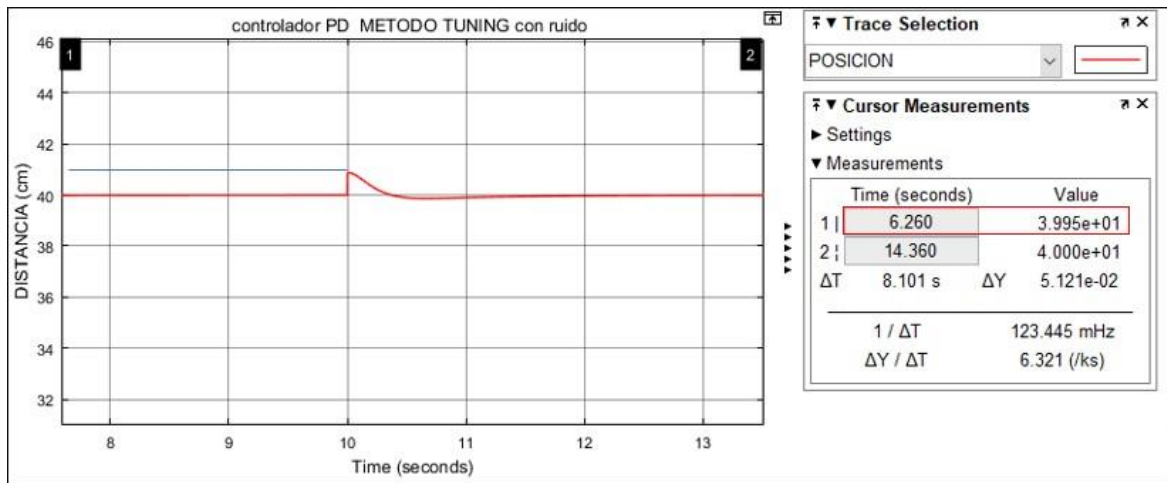


Figura 167 Respuesta etapa estable control PD método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia

9.1.4.2.6. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por Tuning

- Condiciones normales

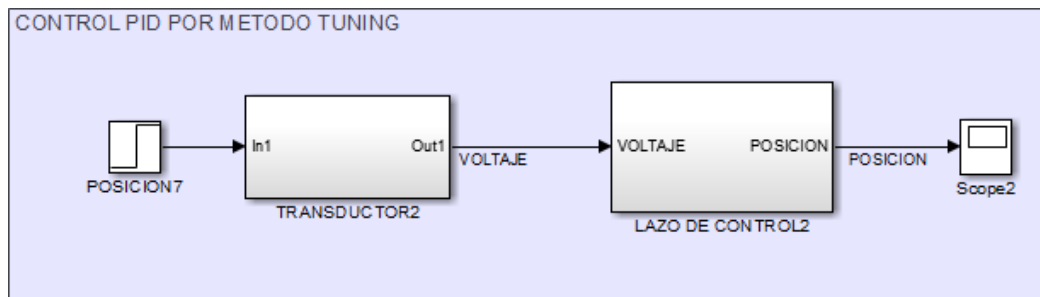


Figura 168 Diagrama de bloques controlador PID método de tuning. Autoría propia

En la figura 169 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

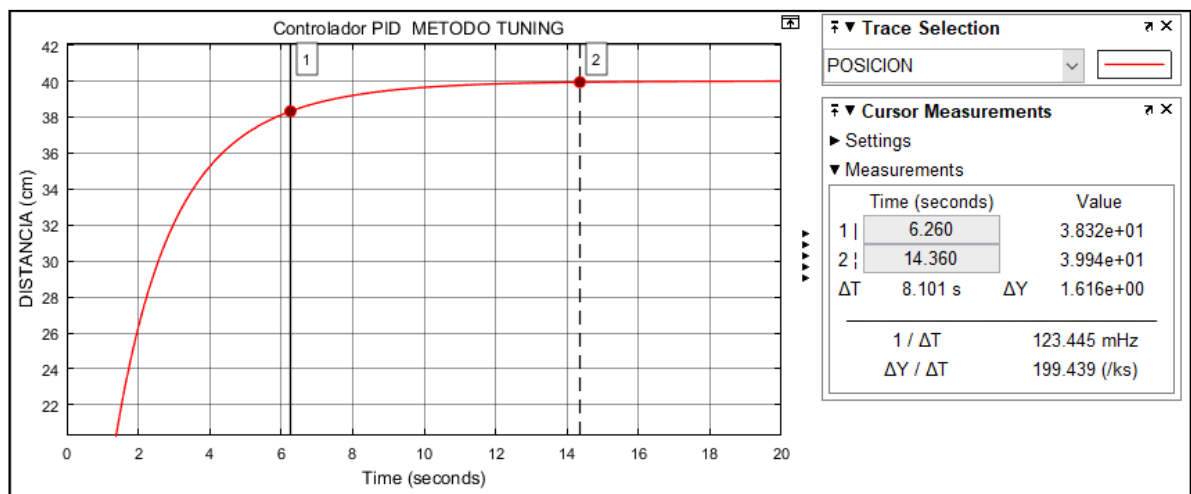


Figura 169 Controlador PID METODO TUNING. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

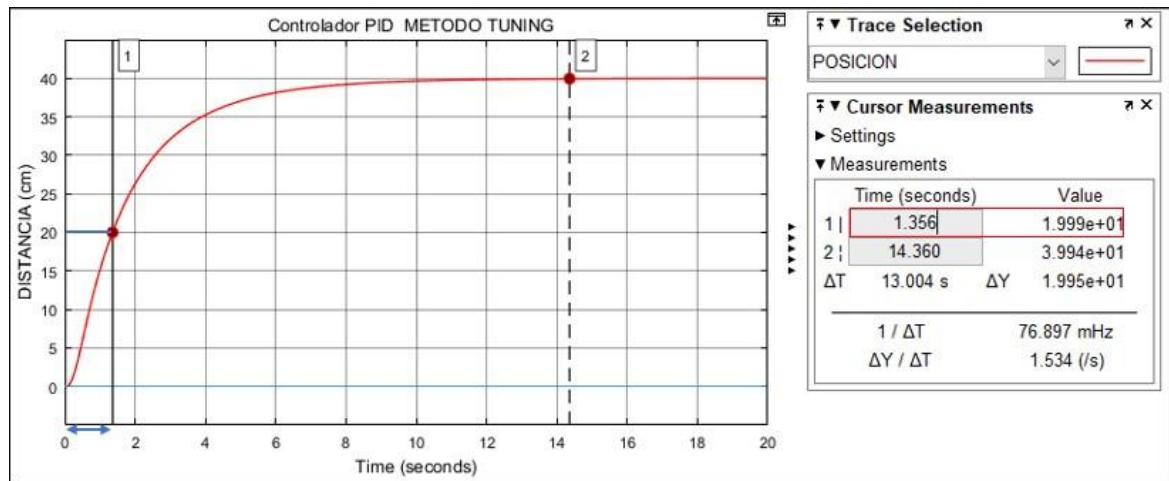


Figura 170 50% del punto de estabilización PID por METODO TUNING. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.356 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

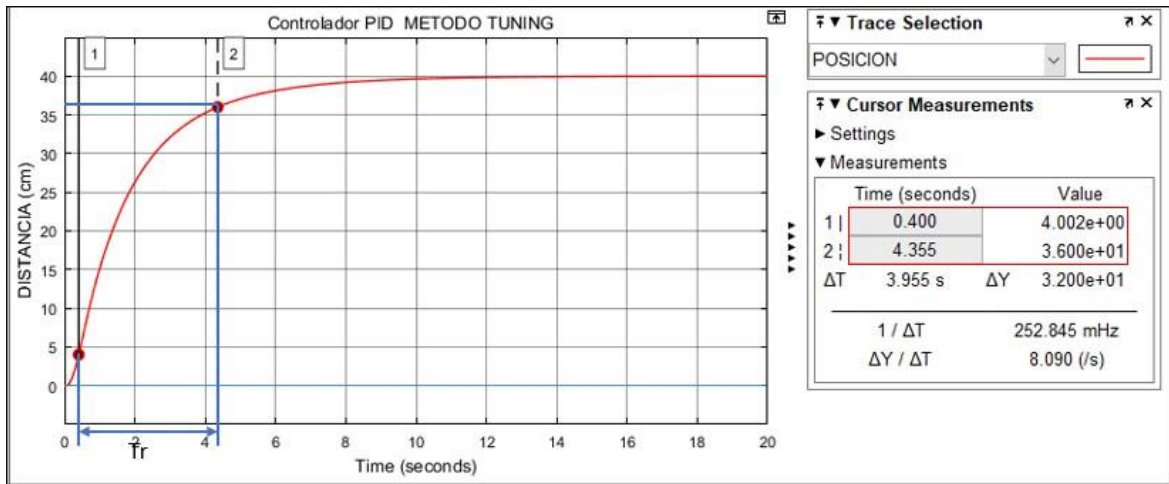


Figura 171 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.4 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 4.355 segundos

$Tr = 4.355 - 0.4 = 3.955$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

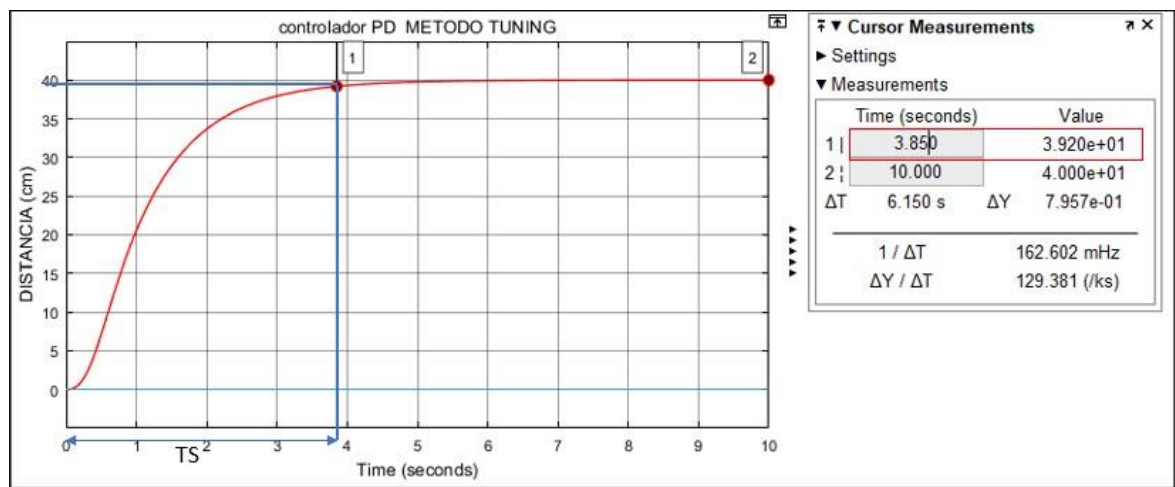


Figura 172 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 3.920 segundos

- Ruido

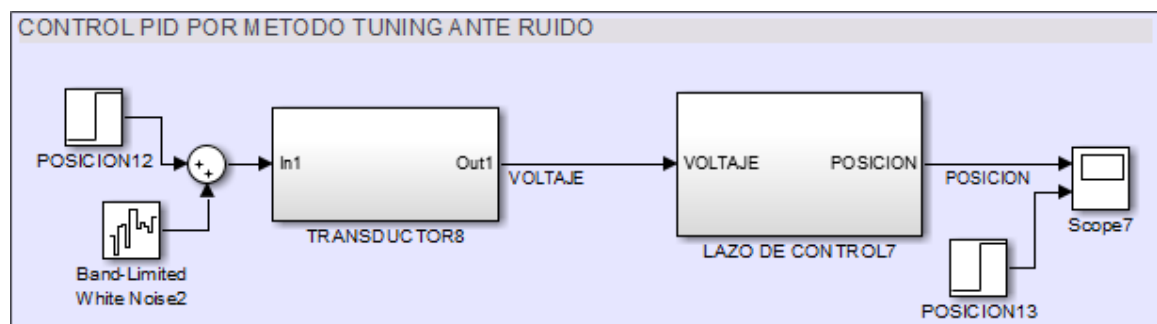


Figura 173 Diagrama de bloques control PID sometido a ruido. Autoría propia

En la figura 174 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

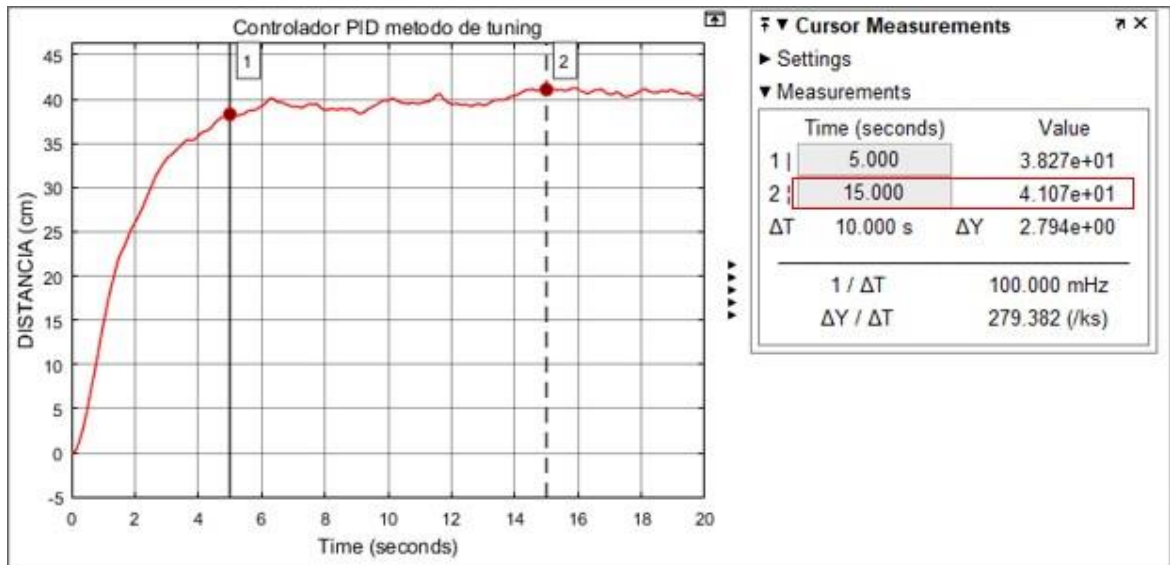


Figura 174 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 41.07 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.53 cm

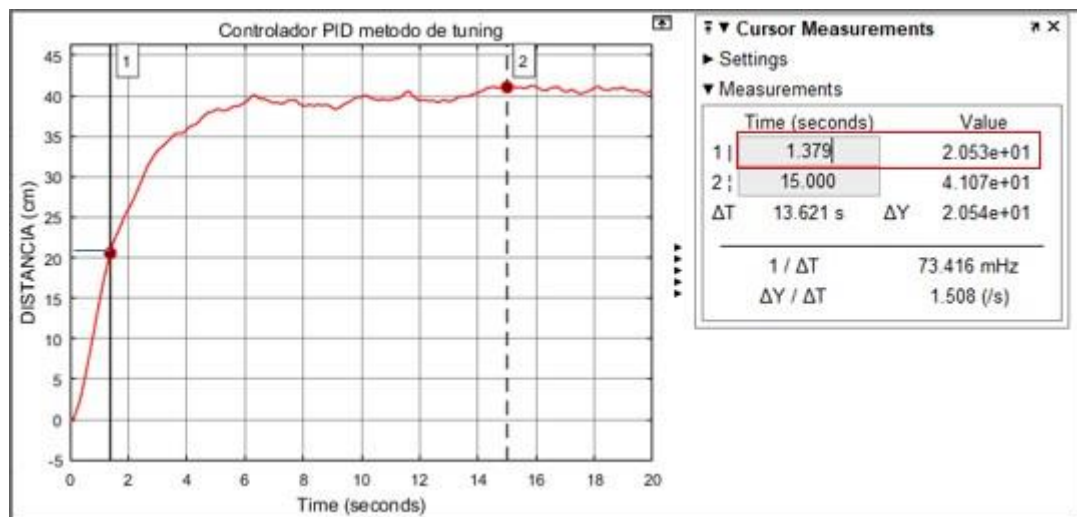


Figura 175 Tiempo de retardo controlador PD por tuning. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =1.379 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36.963cm

10% de VF= 4.107 cm

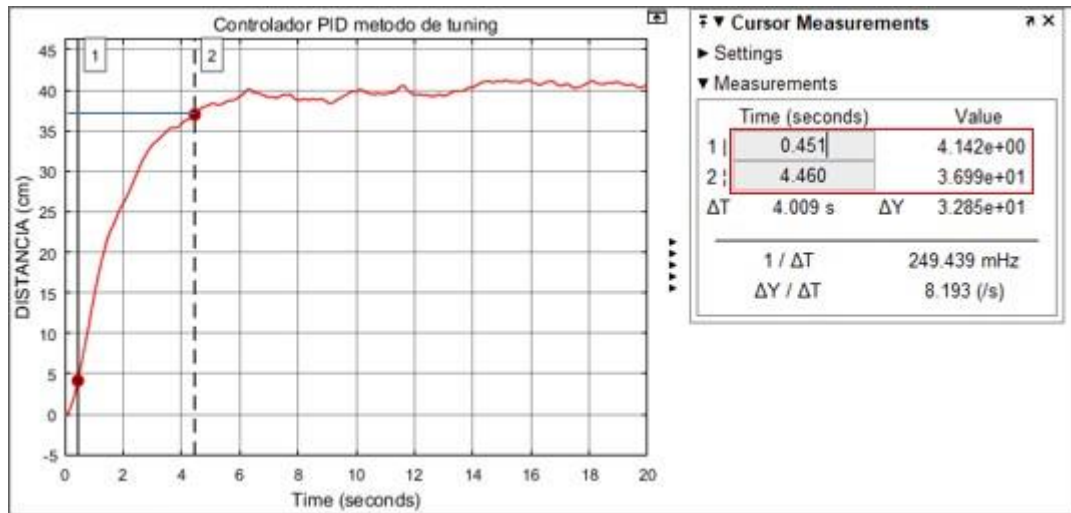


Figura 176 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 4.460 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.451 segundos

$T_r = 4.460 - 0.451 = 4.009$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.82

De esta manera el rango es 41.89 para el límite superior y 40.25 para el límite Inferior.

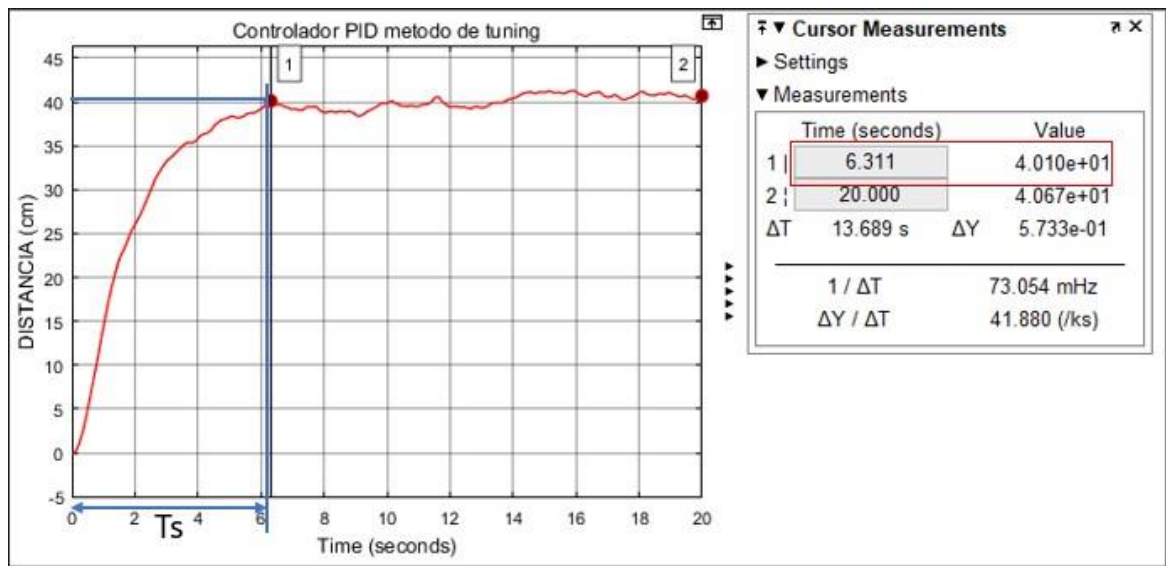


Figura 177 Controlador PID método tuning con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 6.311 segundos

9.1.4.2.7. Estudio del régimen estable del sistema de control PID por Tuning

- Ruido

En la figura 178 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 179 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

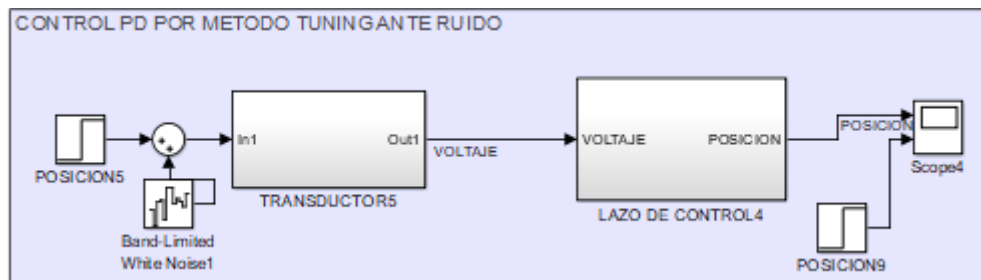


Figura 178 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido

Se somete el sistema a un setpoint de 40 cm dando como respuesta la figura 179

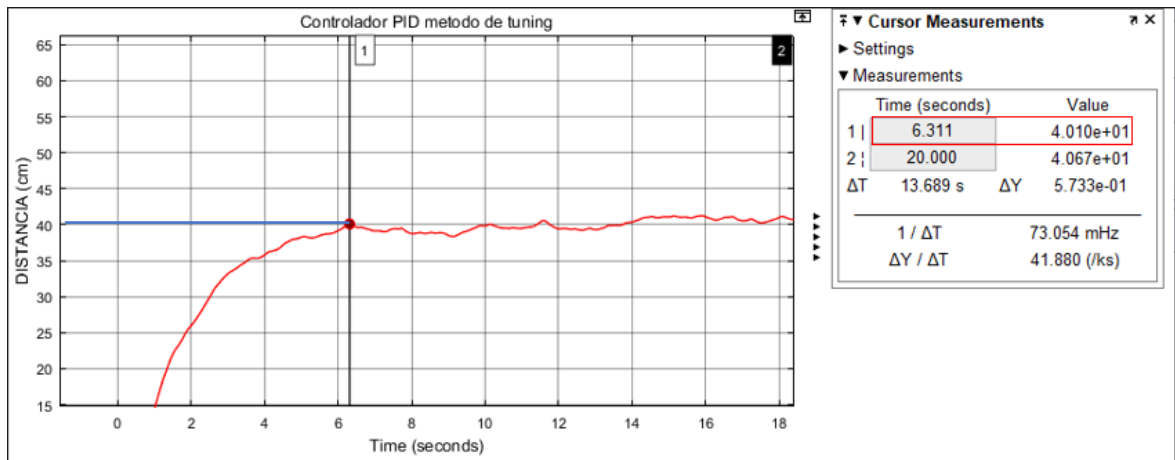


Figura 179 Respuesta transitoria controlador método tuning con ruido. Autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 180 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 181 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

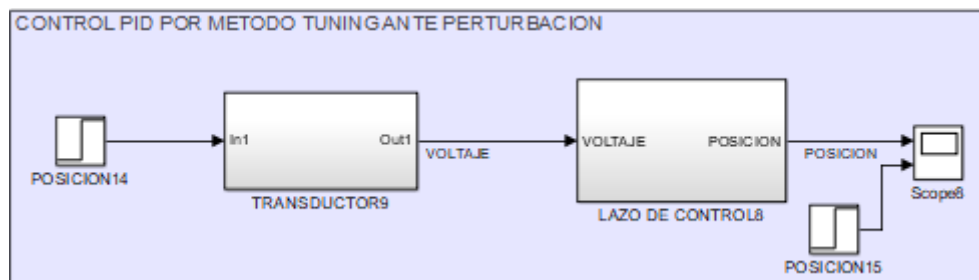


Figura 180 diagrama de bloques control PID método tuning perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 181 el controlador atenúa en un 100% la perturbación

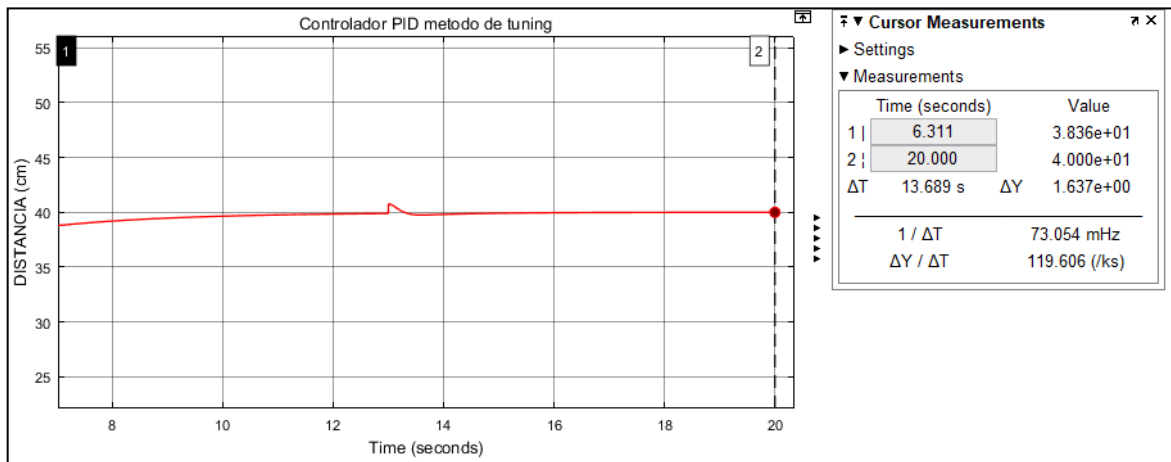


Figura 181 Respuesta etapa estable control PID método de Tuning sometido a perturbación.
Autoría propia

9.2. DISEÑO DE CONTROLADORES DE CONTROL EN CASCADA CON SENSOR ULTRASONICO

En apartados anteriores se ha estudiado de manera detallada el sistema "Ball and beam" objeto de este trabajo, tomando como entrada de este la posición en cm a la que se desea controlar y como salida la posición lineal del carro respecto al extremo de la barra. En este apartado, se plantea el esquema de control más parecido a la realidad, en el que la acción de control sobre la que se puede actuar no es solo la medición de posición del carro, sino que también el ángulo del servomotor.

Efectivamente, no se puede perder de vista que el único actuador del sistema es el servomotor, el cual trabaja usando como variable de salida un ángulo medido sobre su eje, que puede oscilar entre 0° y 330° , pero a la hora del control se va a utilizar solamente una variación de ángulo de 0 a 161° , ya que con esta el sistema Ball and Beam alcanza una buena inclinación y declinación para la oscilación del carro.

En Control de Sistemas, es típico encontrar situaciones en las que las perturbaciones puedan llegar a afectar a la salida de los actuadores. Si no se hace nada para evitarlo, estas perturbaciones inciden sobre el sistema durante un tiempo sin que se realice una acción de control en su contra, por lo cual, la idea es evitar que este efecto se acumule y acabe afectando de manera negativa a la salida.

Por tal razón, se utiliza un lazo primario (externo o maestro) el cual establece a un lazo secundario o esclavo su señal de referencia, y así cualquier perturbación que afecte al sistema será detectada y compensada por el controlador esclavo, antes de que afecte la variable de proceso maestra o primaria, siendo mejorada la respuesta.

Cabe destacar que es de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema que el lazo secundario sea más rápido que el primario.

9.2.1. Control en cascada 1

9.2.1.1. Control de lazo interno por tercer método de Z&N

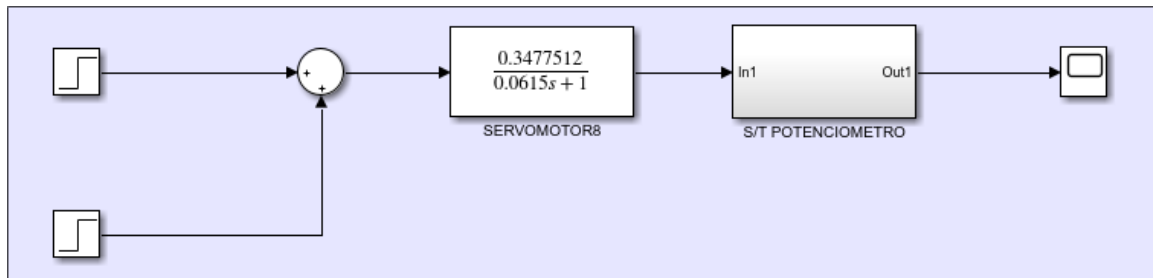


Figura 182 Lazo abierto con dos entradas escalón para obtención de controlador interno.
Autoría propia

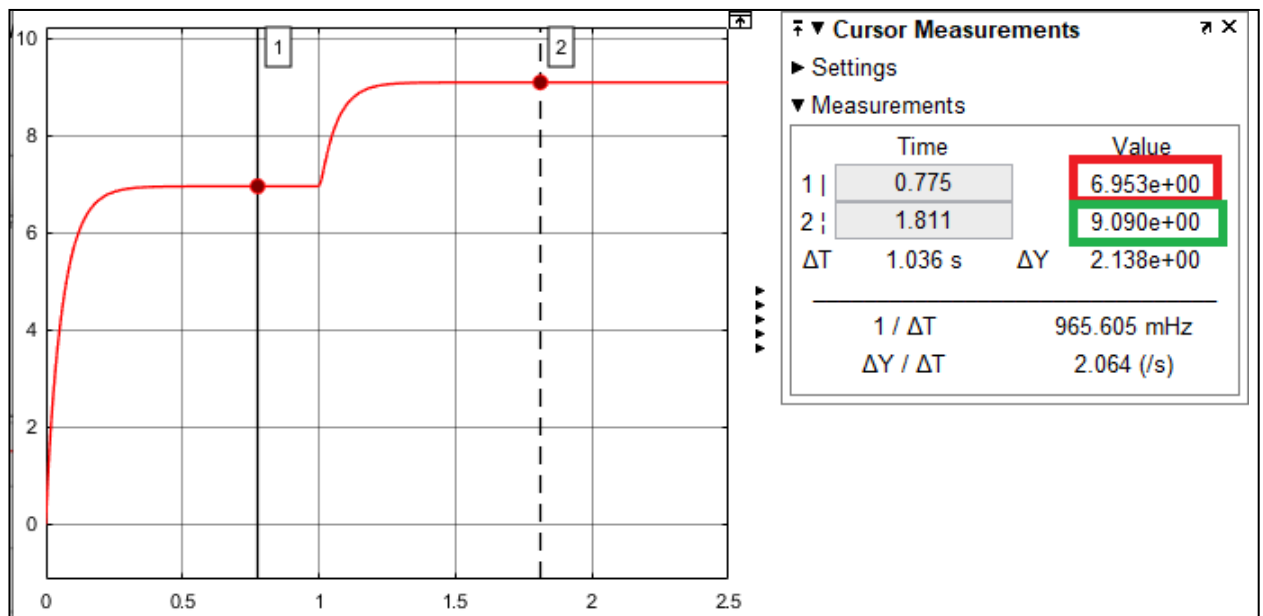


Figura 183 Respuesta del sistema a doble escalón. Autoría propia

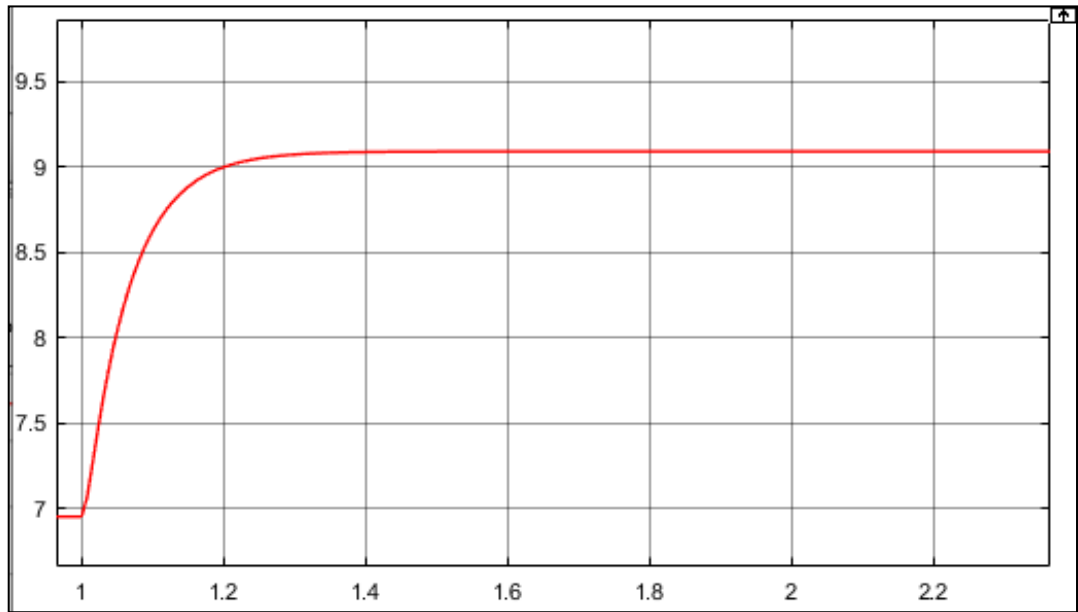


Figura 184 Análisis del segundo escalón. Autoría propia

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{9.090 - 6.953}{500 - 291} = \frac{2.137}{209} = 0.01022488038$$

$$t_{28} = (2.137 * 28,3\%) + 6.953 = 7.557771$$

$$t_{28} = 1.027 - 1 = 0.027$$

$$t_{63} = (2.137 * 63,2\%) + 6.953 = 8.303584$$

$$t_{63} = 1.068 - 1 = 0.068$$

Al encontrar los tiempos en los cuales se establece la señal de salida le aplicamos las ecuaciones para hallar el τ del sistema y el tiempo muerto.

$$\tau = \frac{3}{2} (t_{63} - t_{28}) \quad (41)$$

$$\tau = \frac{3}{2} (0.068 - 0.027)$$

$$\tau = 0.0615$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (42)$$

$$t_m = 0.068 - 0.0615$$

$$t_m = 0.0065$$

Tabla 22 tabla de controlador por Z&N

	Kc	Ti	Td
P	$\frac{1}{k} t_o^{-1}$		
PI	$\frac{0.9}{k} t_o^{-1}$	$3.33 t_o$	
PID	$\frac{1.2}{k} t_o^{-1}$	$2 t_o$	$\left(\frac{1}{2}\right) t_o$

Fuente: OGATA, Katsuhiko. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica Kcr y periodo crítico Pcr (segundo método) [imagen]. PEARSON EDUCACIÓN, 2010. p.571.

Por medio de la Tabla 22 de Z&N podemos guiarnos para iniciar a realizar el controlador PID.

El Kp que se obtiene es:

$$k_p = k_c \quad (43)$$

$$k_p = \frac{1.2}{0.01022488038} \left(\frac{0.0065}{0.0615} \right)^{-1} = 1110.413592$$

El Ki que se obtiene es:

$$k_i = \frac{k_p}{t_i} \quad (44)$$

$$t_i = 2 * 0.0065 = 0.013$$

$$k_i = 85416.43015$$

El Kd que se obtiene es:

$$k_d = k_p * t_d \quad (45)$$

$$t_d = \left(\frac{1}{2} \right) * 0.0065 = 0.00325$$

$$k_d = 3.608844174$$

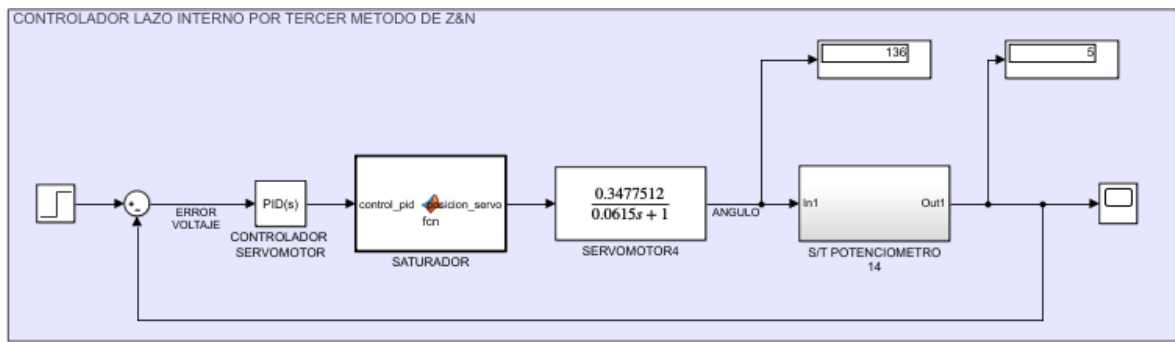


Figura 185 Lazo de control para controlador interno. Autoría propia

Procedemos a comprobar el controlador del primer proceso, con un set point de 5V y se obtiene la respuesta mostrada en la figura 186:

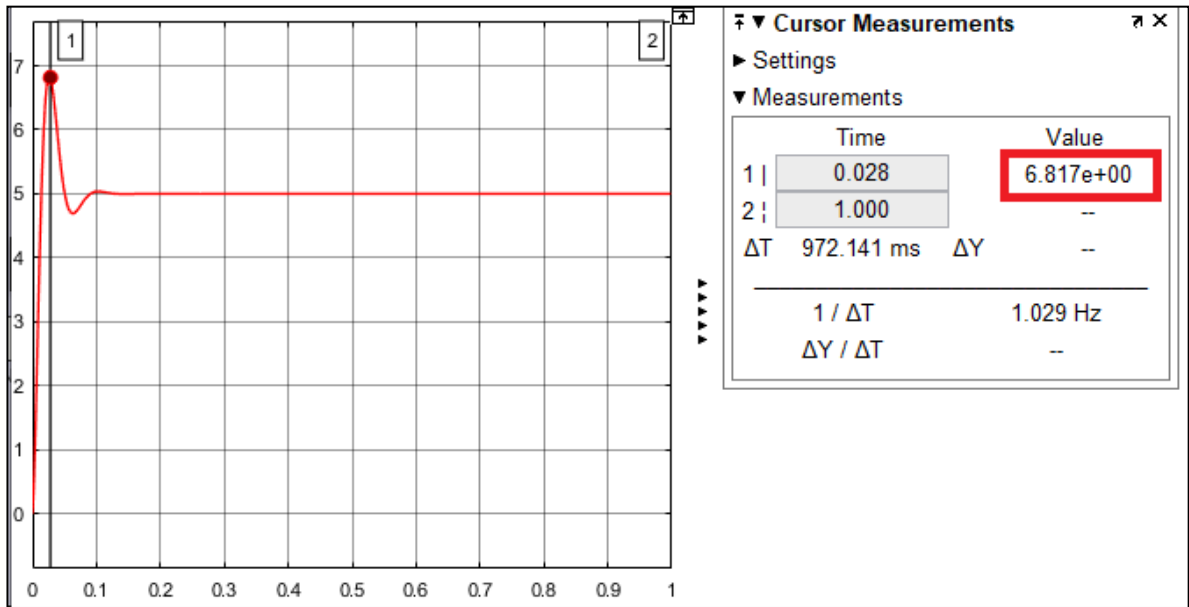


Figura 186 Respuesta del sistema del lazo de control interno. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 186 la respuesta converge en la posición deseada, pero en el régimen transitorio el sistema tiene un pico mayor al 10% de la entrada, por lo tanto, se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 23 Ajuste para mejorar el controlador por ensayo y error. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	1110,413592	-		-		-		900	
Ki	85416,43015	70000	Mejoro	50000	Mejoro	20000	Mejoro	-	Mejoro
Kd	3,608844174	-		-		-		-	

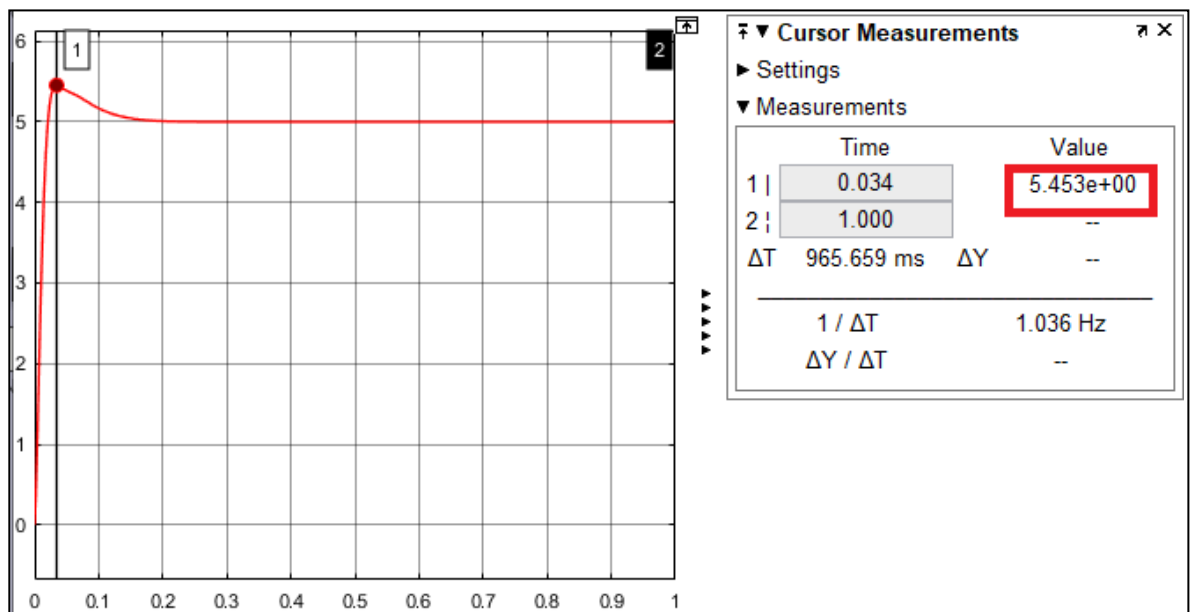


Figura 187 Respuesta del sistema mejorada

9.2.1.2. Control de lazo externo por método manual

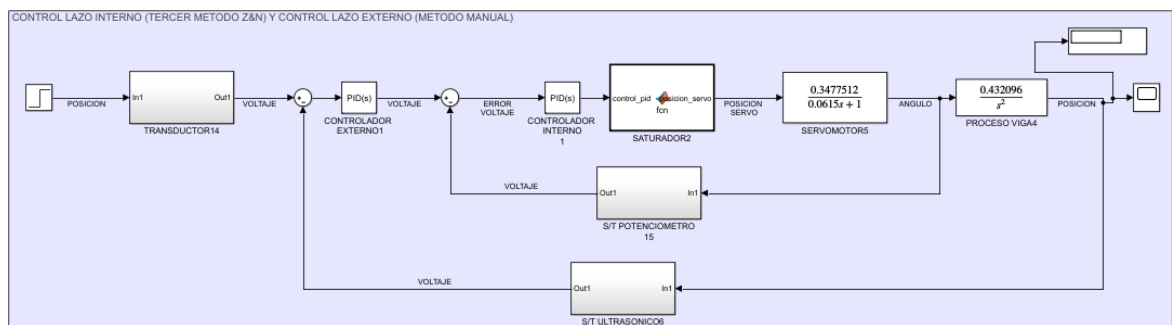


Figura 188 Lazo de control en cascada con controlador externo manual. Autoría propia

Tabla 24 Ajuste de controlador manual externo. Autoría propia

METODO MANUAL				
	Kp	Ki	Kd	Resultado
Valores iniciales	0	0	0	-
Ajuste 1	0,1	-	-	Malo
Ajuste 2	1	-	-	Bueno
Ajuste 3	-	-	6	Bueno
Ajuste 4	-	-	8	Bueno
Ajuste 5	-	0,05	-	Malo
Ajuste 6	-	0,1	-	Bueno
Ajuste 7	-	0,2	-	Bueno
Ajuste 7	-	-	9	Bueno
Ajuste 7	-	0,3	-	Malo
Ajuste 8	2	-	-	Bueno
Valores finales	2	0,2	9	PID

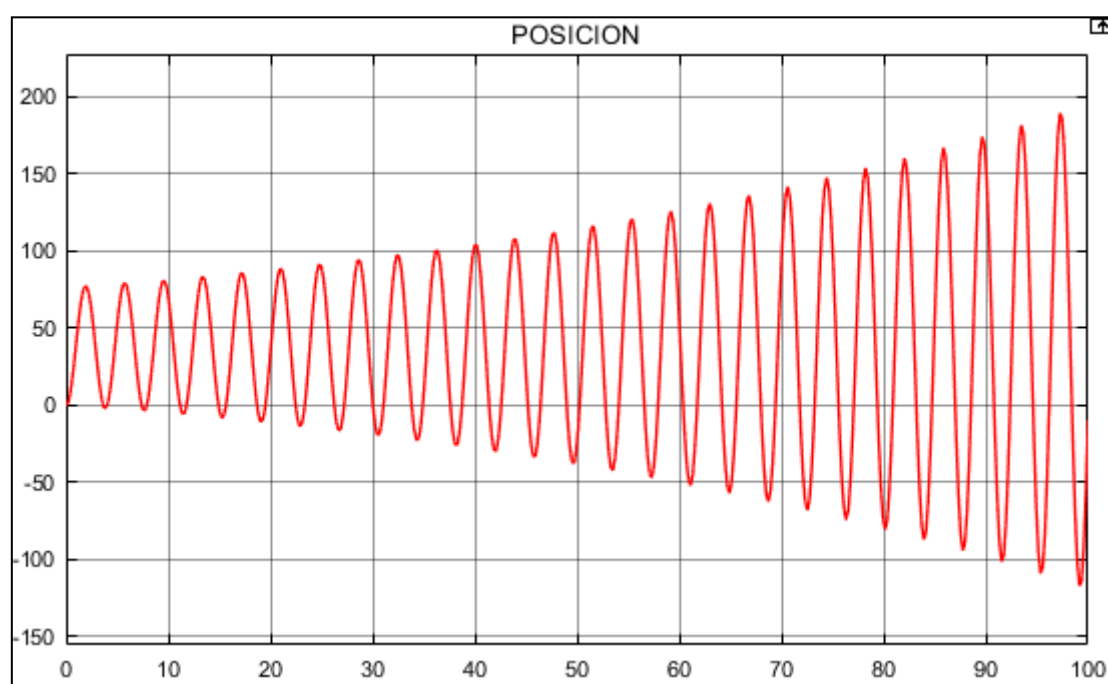


Figura 189 Grafica con parámetro Kp. Autoría propia

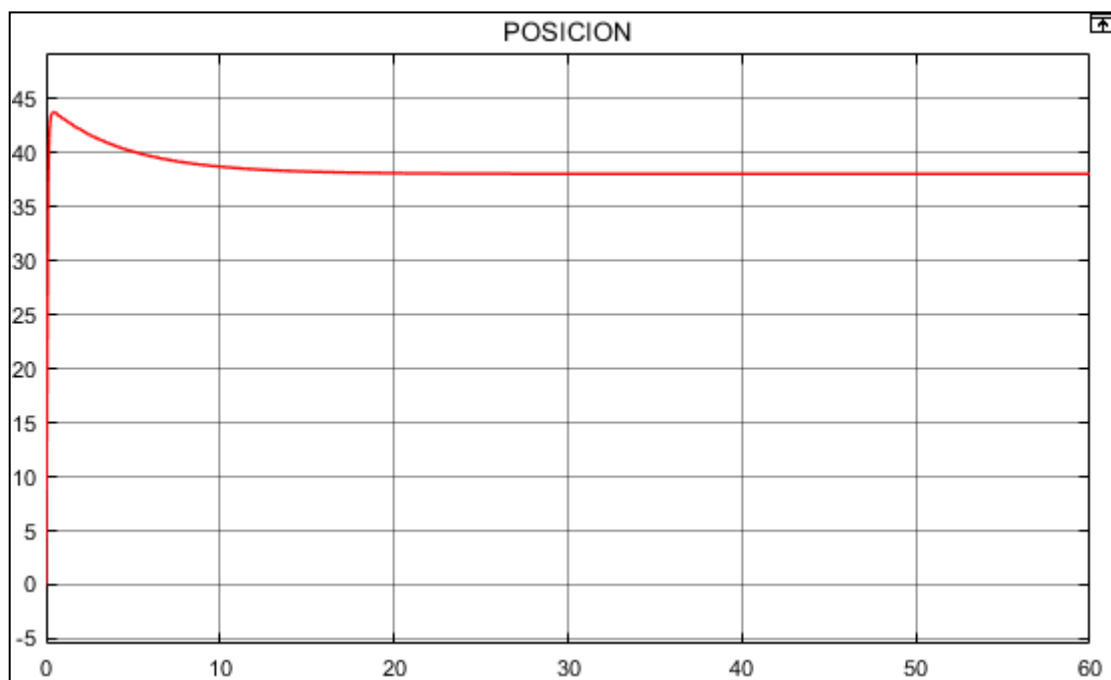


Figura 190 grafica controlador PID. Autoría propia

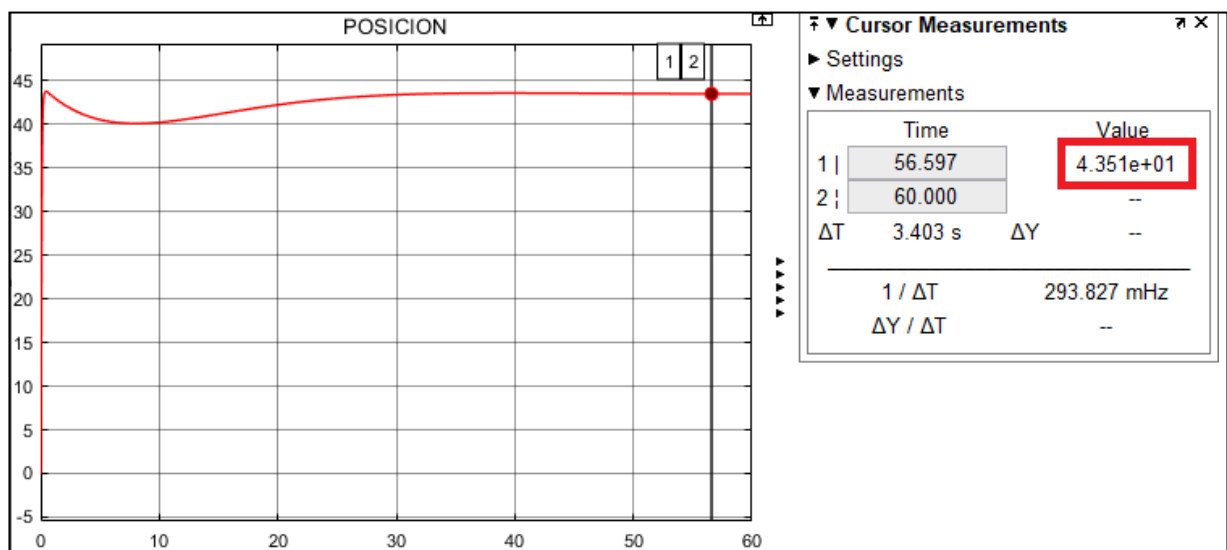


Figura 191 Error lazo interno. Autoría propia

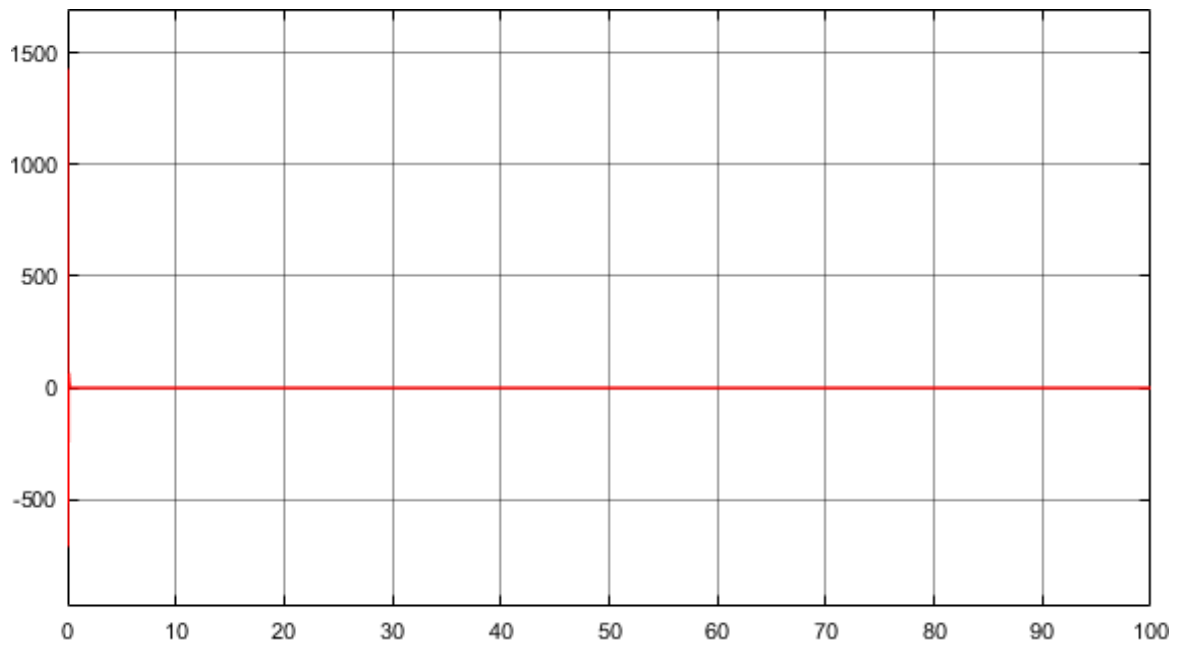


Figura 192 Error lazo externo. Autoría propia

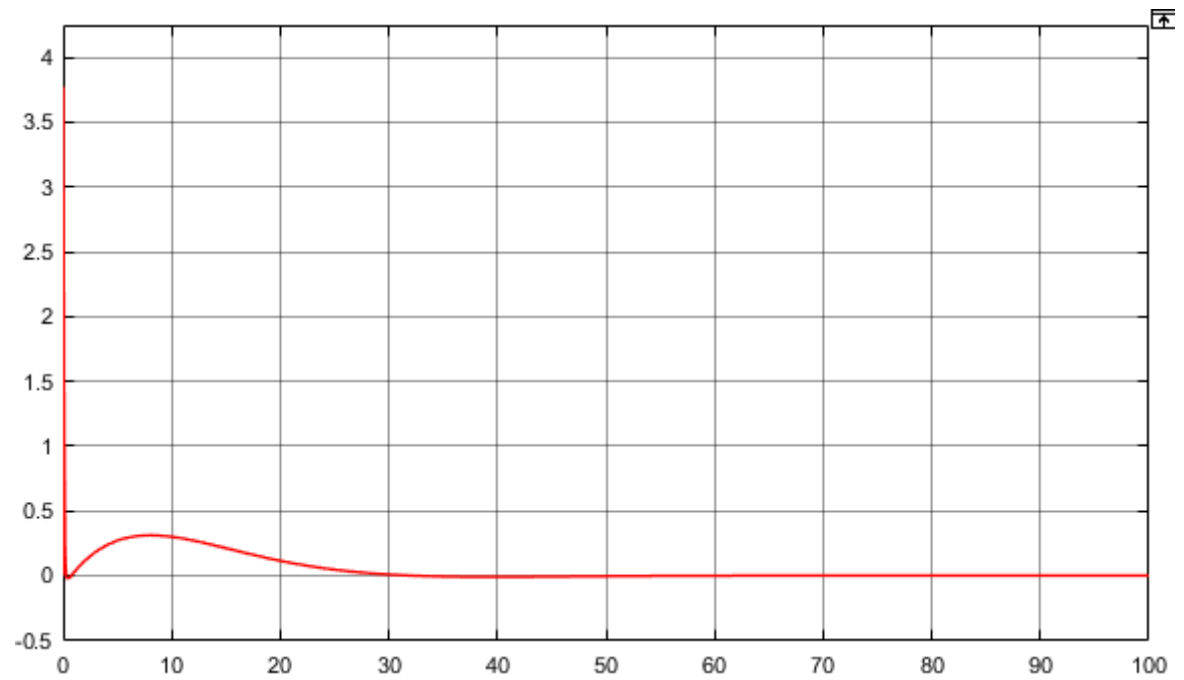


Figura 193 Grafica del error lazo interno. Autoría propia

9.2.1.3. Control de lazo externo por método Tuning

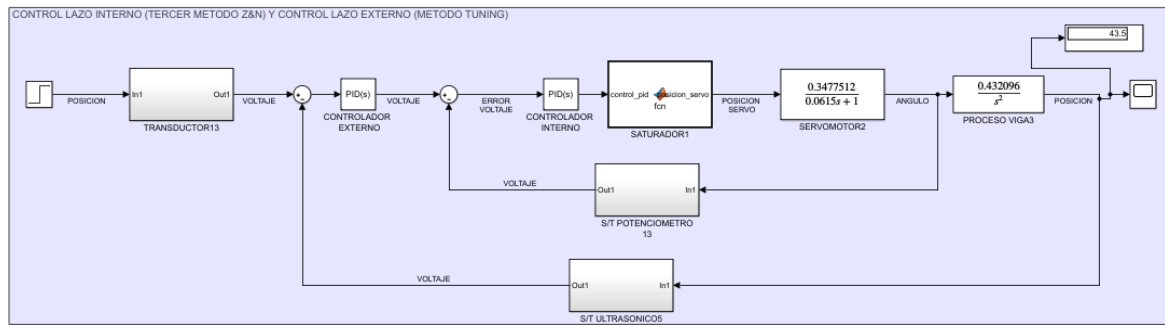


Figura 194 Controlador lazo externo método tuning. Autoría propia



Figura 195 Respuesta controlador lazo externo por método tuning. Autoría propia

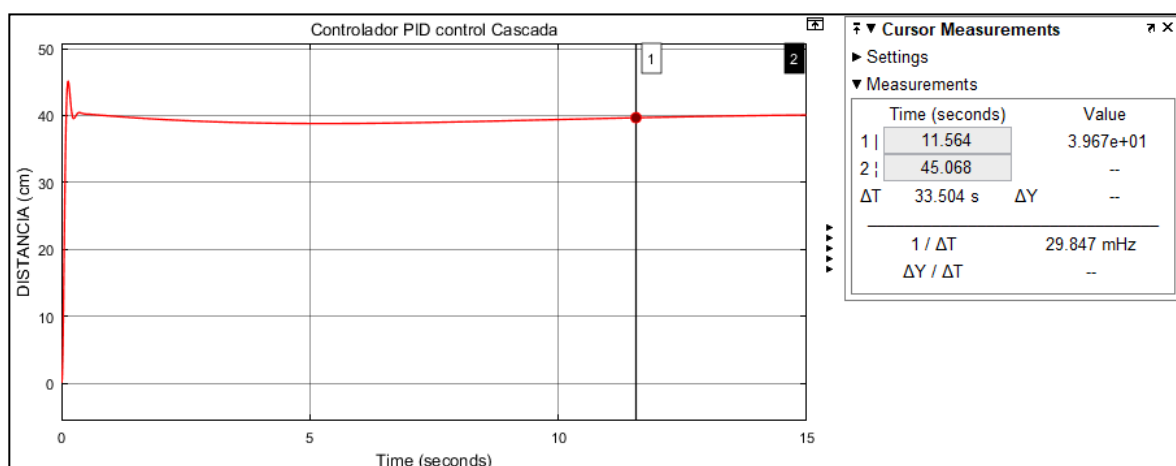


Figura 196 Respuesta controlador en cascada. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 196 la respuesta converge en la posición deseada, pero en el régimen transitorio el sistema tiene un pico mayor al 10% de la entrada, por lo tanto, se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 25 Ajuste parámetros controlador tuning. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	4,076732844	5	Empeoro	-	Mejoro	-	Mejoro	-	Mejoro
Ki	1,120171596	-		-		-		-	
Kd	3,595035241	-		4		6		8	

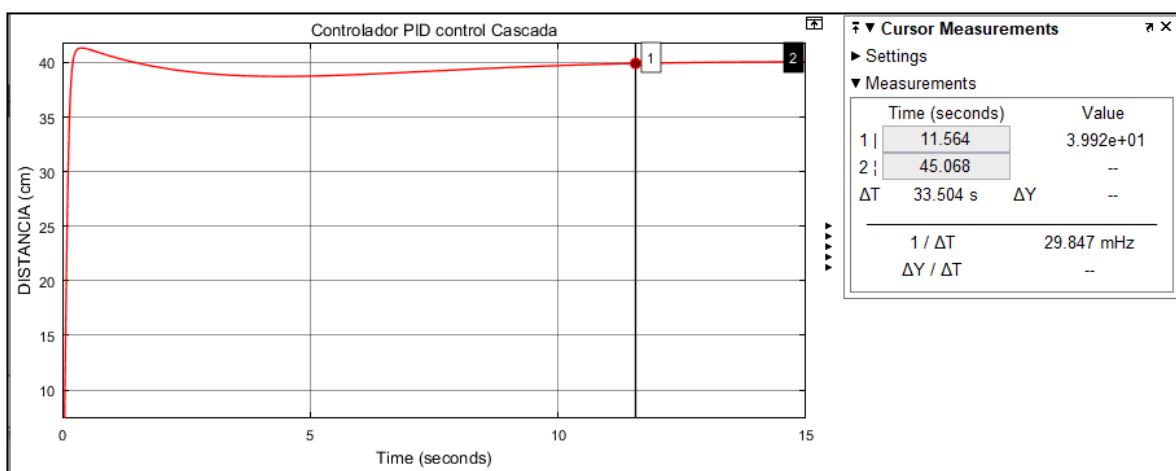


Figura 197 Respuesta controlador ajustado. Autoría propia

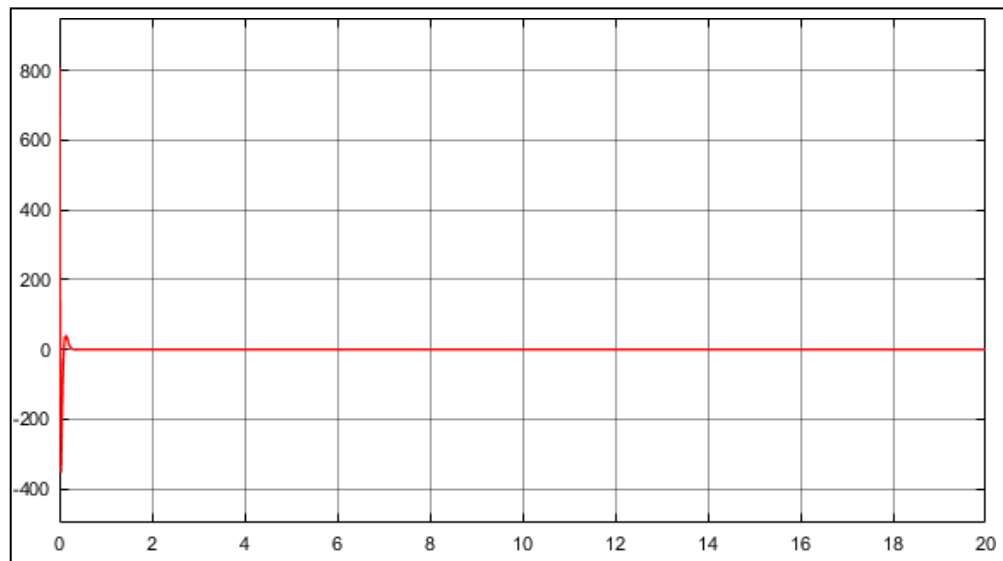


Figura 198 Error del controlador del lazo interno. Autoría propia

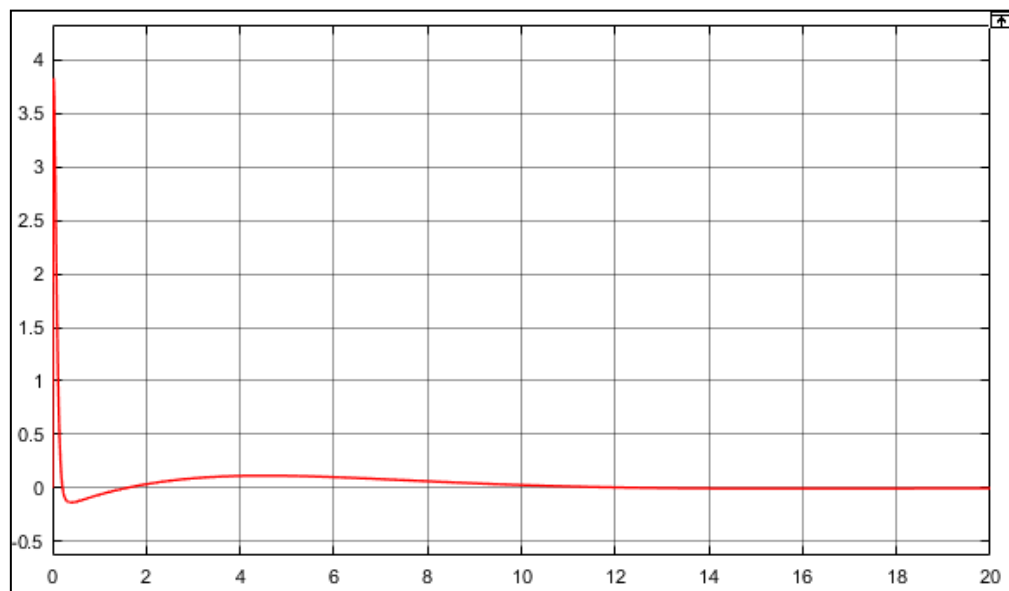


Figura 199 Error lazo externo controlador. Autoría propia

9.2.2. Control en cascada 2

9.2.2.1. Control de lazo interno por método de Dahlin

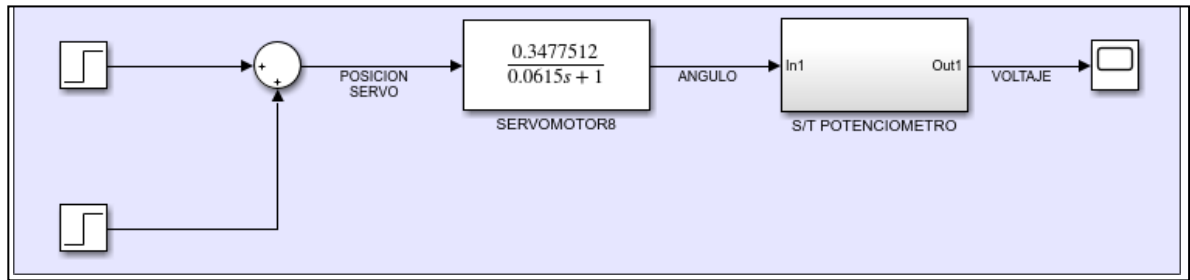


Figura 200 Método DAHLIN lazo de control interno. Autoría propia

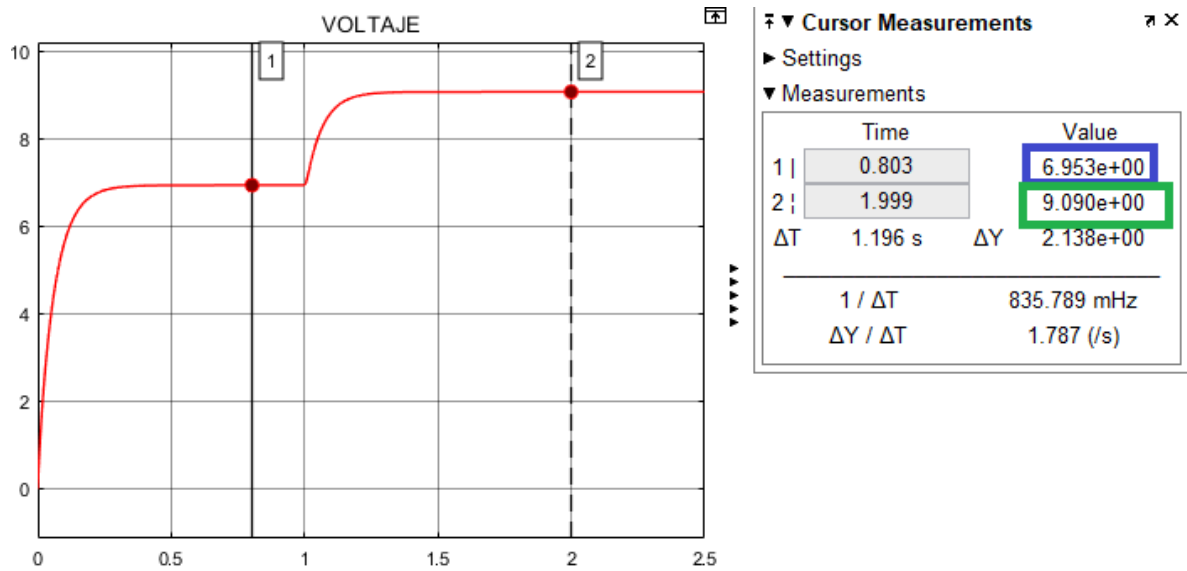


Figura 201 Respuesta del sistema sometido a dos escalones. Autoría propia

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{9.090 - 6.953}{500 - 291} = \frac{2.137}{209} = 0.01022488038$$

$$t_{28} = (2.137 * 28,3\%) + 6.953 = 7.557771$$

$$t_{28} = 1.027 - 1 = 0.027$$

$$t_{63} = (2.137 * 63,2\%) + 6.953 = 8.303584$$

$$t_{63} = 1.068 - 1 = 0.068$$

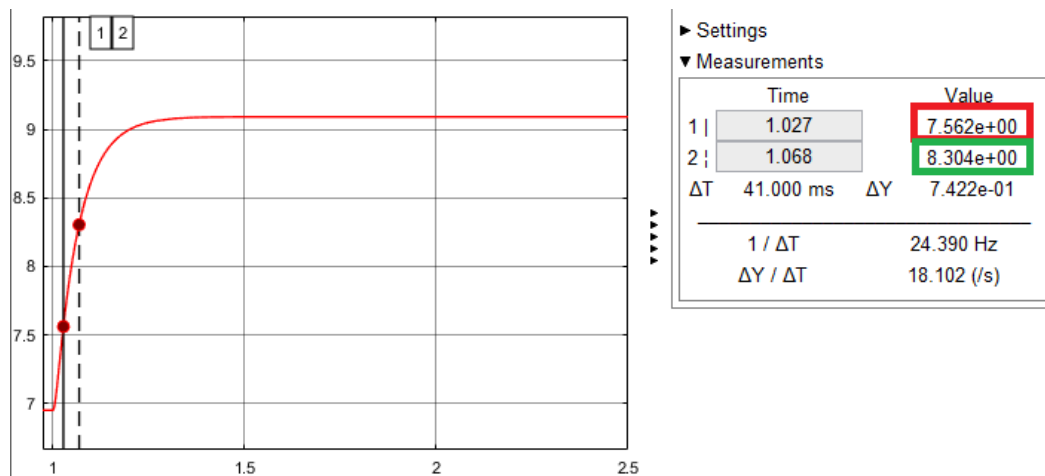


Figura 202 Tiempos de 28 y 63 %. Autoría propia

Al encontrar los tiempos en los cuales se establece la señal de salida le aplicamos las ecuaciones para hallar el τ del sistema y el tiempo muerto.

$$\tau = \frac{3}{2} (t_{63} - t_{28}) \quad (46)$$

$$\tau = \frac{3}{2} (0.068 - 0.027)$$

$$\tau = 0.0615$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (47)$$

$$t_m = 0.068 - 0.0615$$

$$t_m = 0.0065$$

Teniendo el tiempo muerto, el τ y la ganancia del sistema se procede a hallar el controlador por método de Dahlin:

Controlador	Parámetro de Ajuste	Ecuación
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	k_p	$\frac{1.2}{2k} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$
	τ_i	τ
	τ_d	$\frac{t_0}{2}$

Figura 203 Constantes controlador método DAHLIN

Fuente: Diagrama de control [en línea]. Disponible en:
https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap9_html/capitulo-9.html

El Kp que se obtiene es:

$$k_p = \frac{1.2}{2 * 0.01022488038} \left(\frac{0.0065}{0.0615} \right)^{-1} = 555.2067962$$

El Ki que se obtiene es:

$$k_i = \frac{k_p}{t_i} \quad (48)$$

$$t_i = 0.0615$$

$$k_i = 9027.752784$$

El Kd que se obtiene es:

$$k_d = k_p * t_d \quad (49)$$

$$t_d = \left(\frac{1}{2} \right) * 0.0065 = 0.00325$$

$$k_d = 1.804422088$$

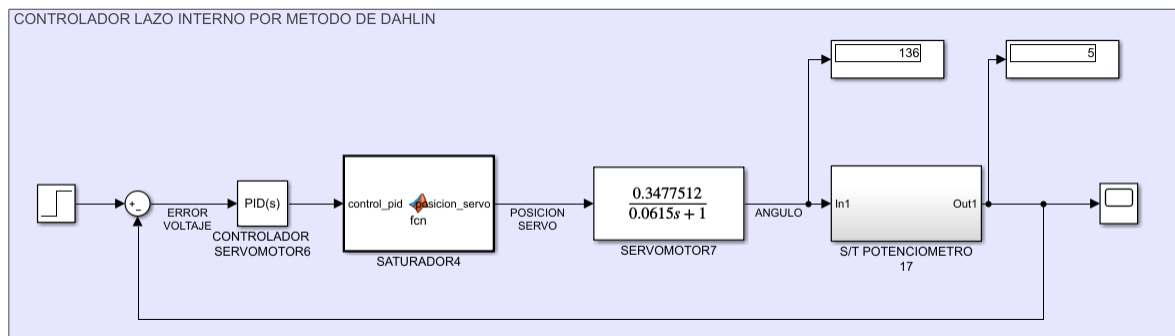


Figura 204 control lazo interno método DAHLIN. Autoría propia

Con un set point de 5 v se obtiene la siguiente respuesta:

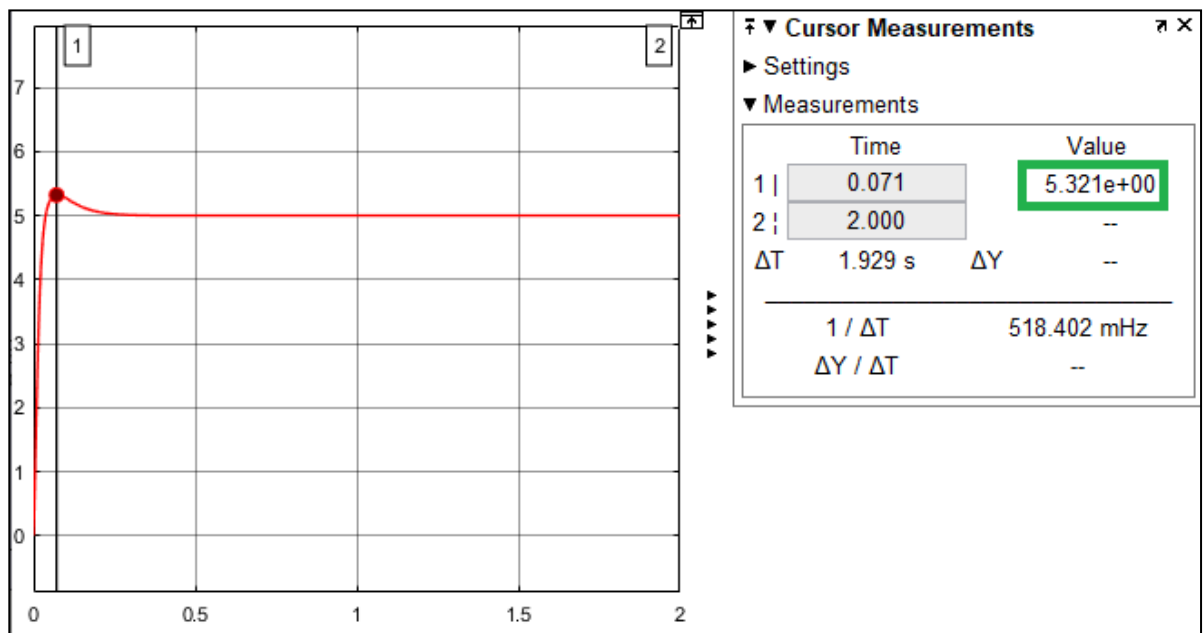


Figura 205 Respuesta controlador lazo interno. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 205 la respuesta converge en la posición deseada y con un tiempo bastante rápido, además en el régimen transitorio el sistema tiene un pico menor al 10% de la entrada, por lo tanto, este tipo de respuesta se considera afable para este sistema.

9.2.2.2. Control de lazo externo por método manual

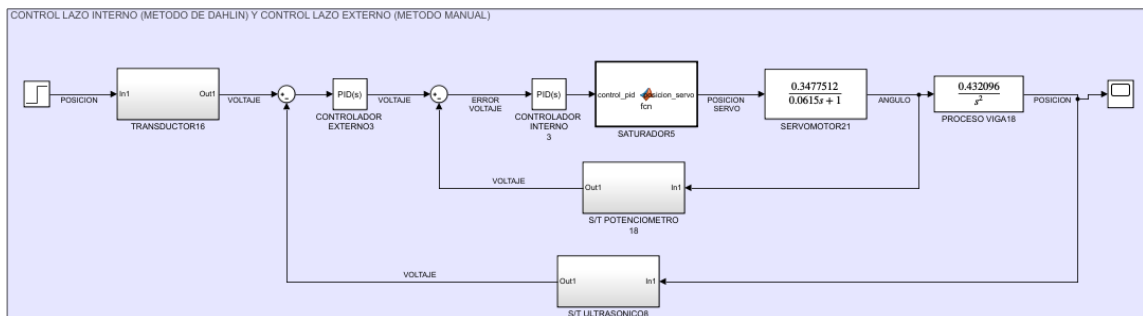


Figura 206 Diagrama de bloques control lazo externo método manual. Autoría propia

Tabla 26 Ajuste parámetros del controlador. Autoría propia

METODO MANUAL				
	Kp	Ki	Kd	Resultado
Valores iniciales	0	0	0	-
Ajuste 1	1,5	-	-	Bueno
Ajuste 2	-	-	7	Bueno
Ajuste 3	-	2	-	Malo
Ajuste 4	-	1	-	Bueno
Ajuste 5	1	-	-	Malo
Ajuste 6	3	-	-	Bueno
Ajuste 7	4	-	-	Bueno
Ajuste 7	-	-	12	Malo
Ajuste 7	-	-	8	Bueno
Ajuste 8	-	0,8	-	Bueno
Valores finales	4	0,8	8	PID

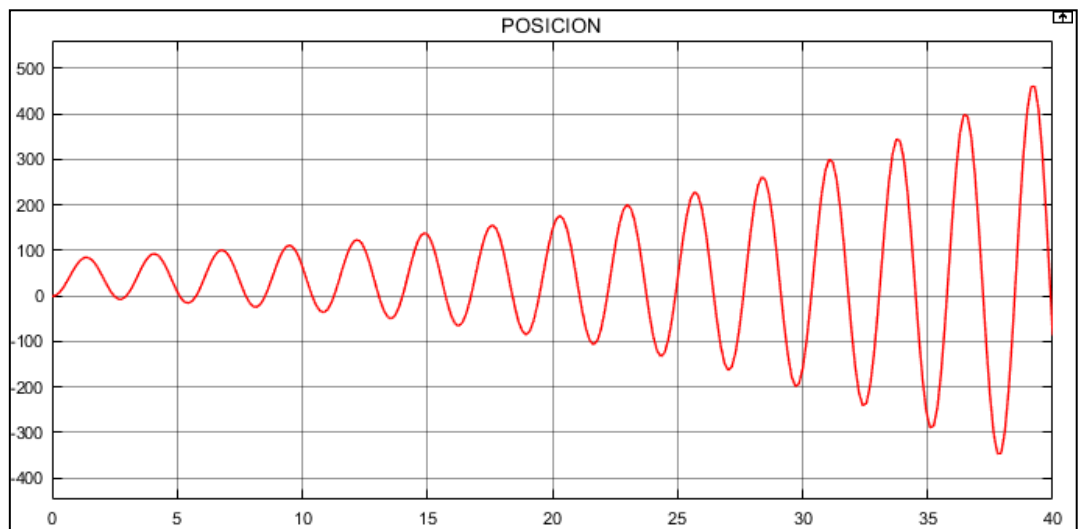


Figura 207 grafica con Kp. Autoría propia

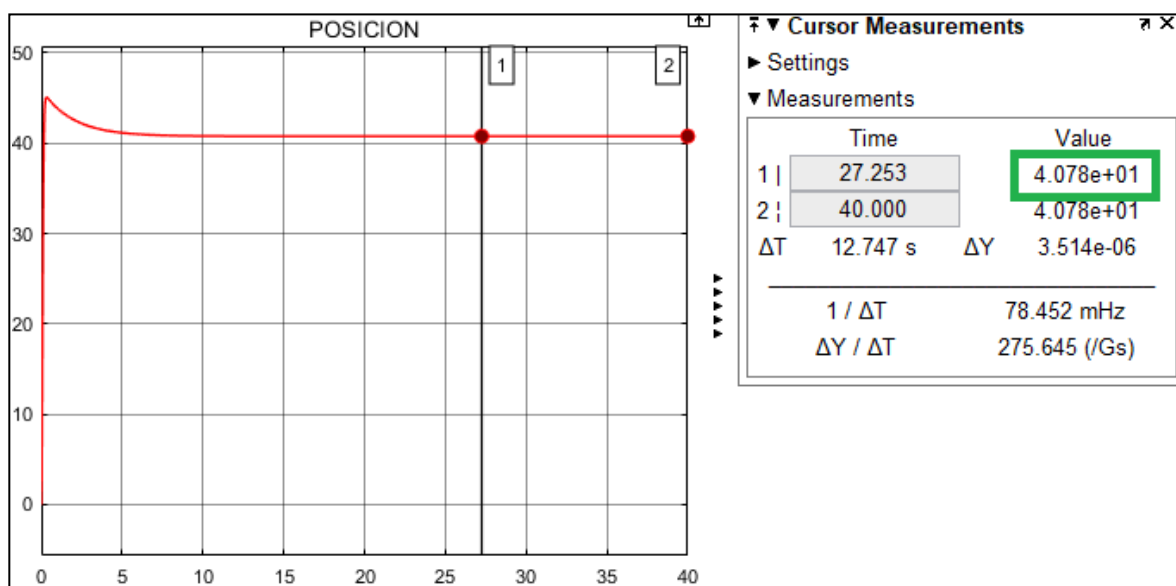


Figura 208 Grafica con Kp y Kd. Autoría propia

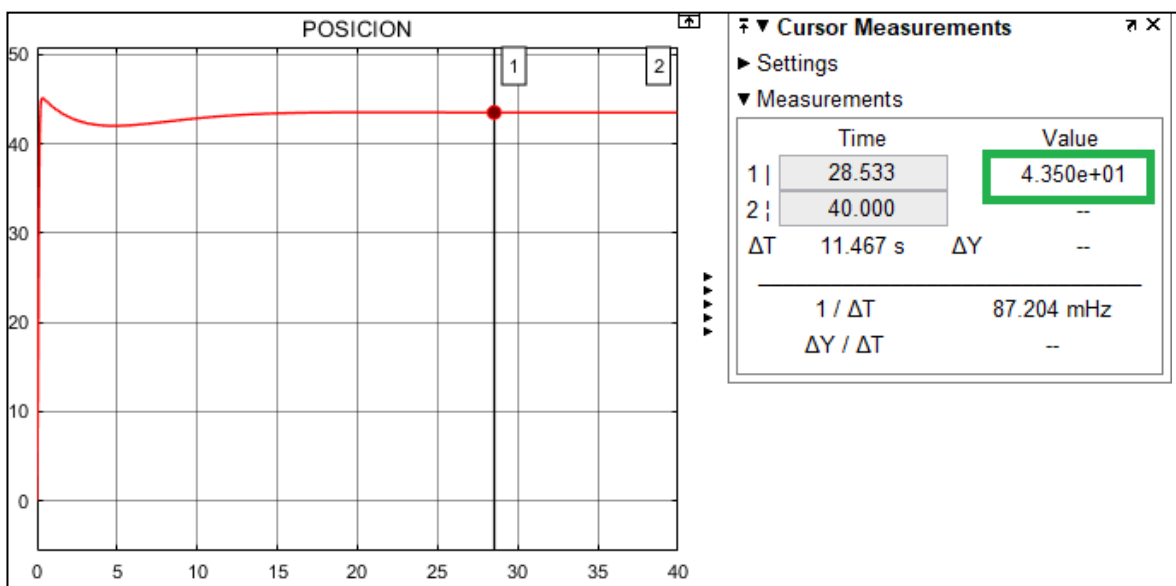


Figura 209 Grafica con Kp, Ki y Kd. Autoría propia

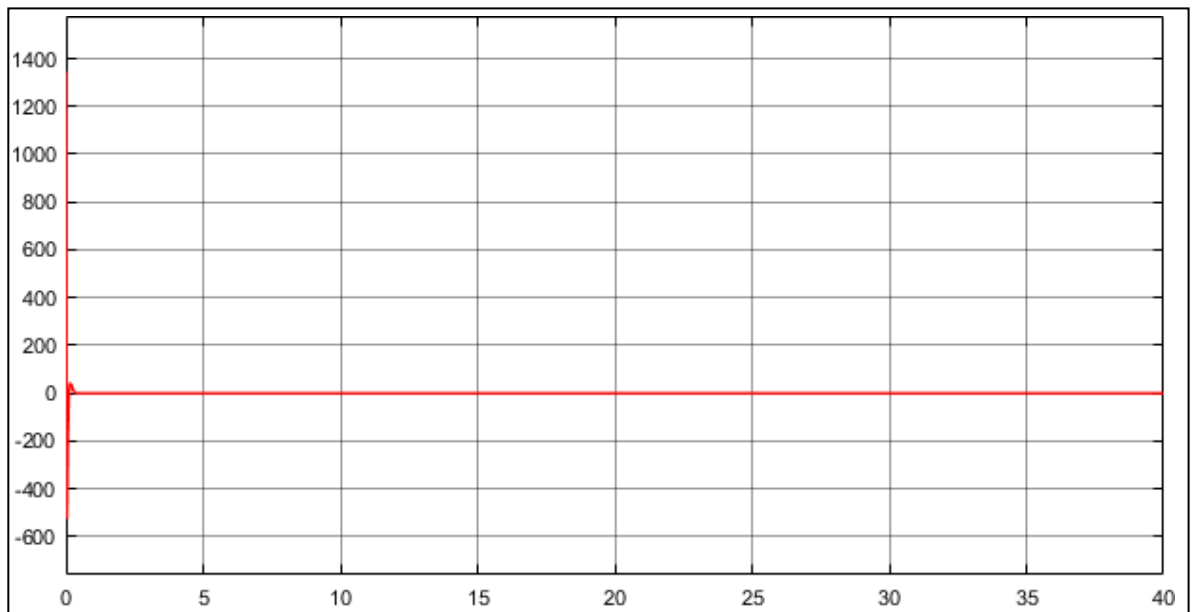


Figura 210 Error interno. Autoría propia

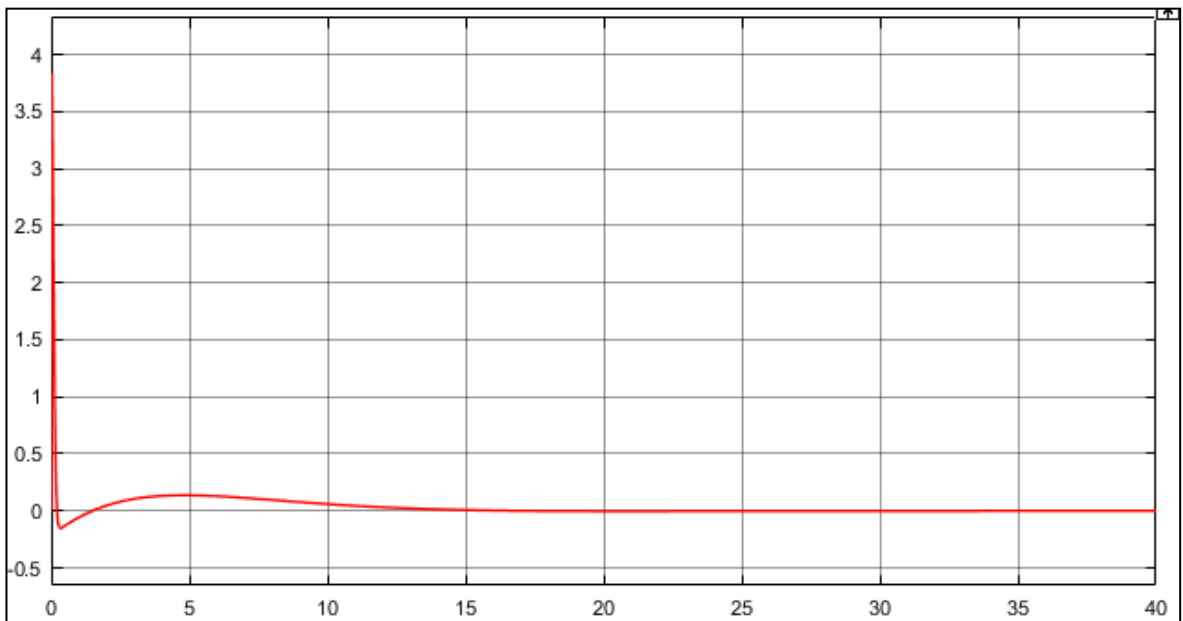


Figura 211 Error lazo externo. Autoría propia

9.2.2.3. Control de lazo externo por método Tuning

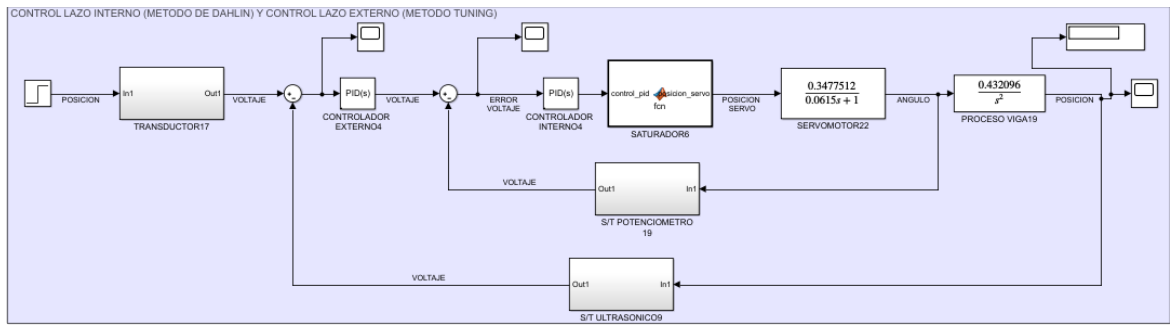


Figura 212 Control lazo externo método tuning. Autoría propia

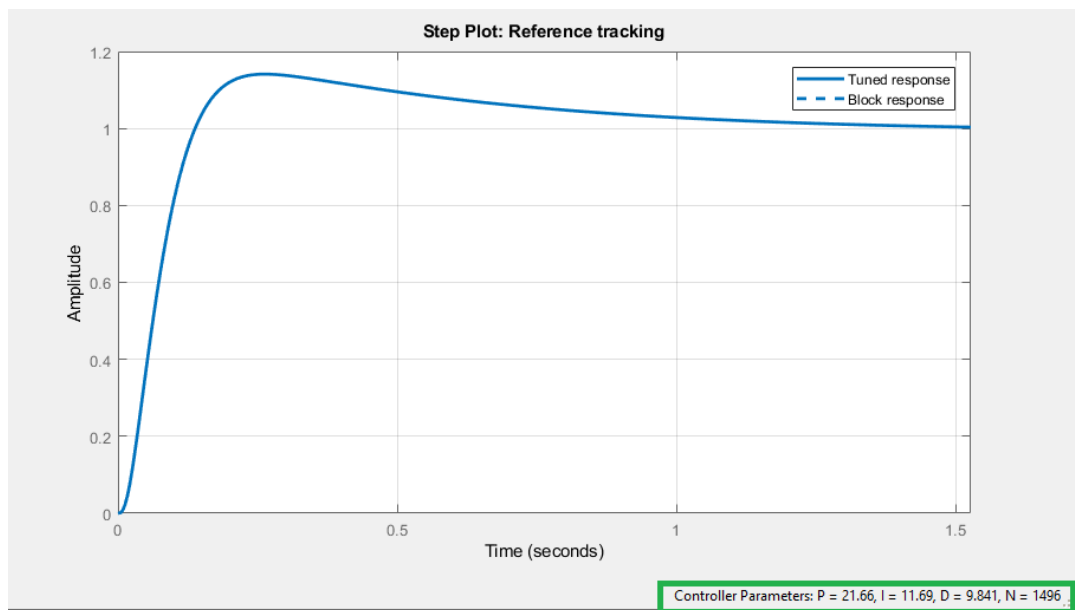


Figura 213 Respuesta del controlador por método de tuning. autoría propia

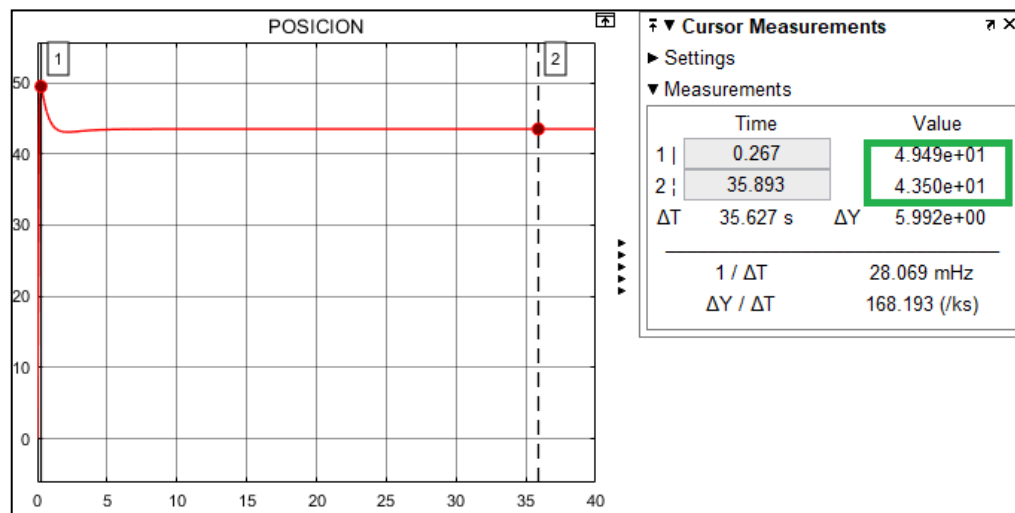


Figura 214 Respuesta del controlador en cascada con lazo externo PID por tuning. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 214 la respuesta converge en la posición deseada y con un tiempo corto lo cual hace afable el controlador, pero en el régimen transitorio la señal presenta un sobre impulso mayor al 10% del valor deseado, por lo tanto, se va a ajustar el control del sistema de forma empírica para mejorar este pequeño problema, dicho esto se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 27 Tabla ensayo y error método tuning. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	21,6564051	18	Mejoro	16	Mejoro	15	Mejoro	14,25	Mejoro
Ki	11,68578943	-	Mejoro	-	Mejoro	-	Mejoro	-	Mejoro
Kd	9,84124787	-	Mejoro	-	Mejoro	-	Mejoro	-	Mejoro

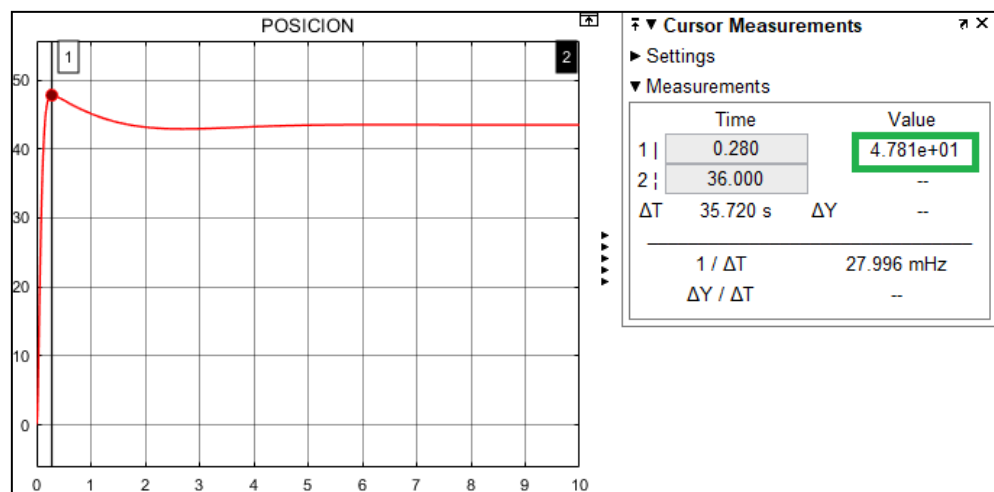


Figura 215 Respuesta controlador con ajuste manual de los parámetros. Autoría propia

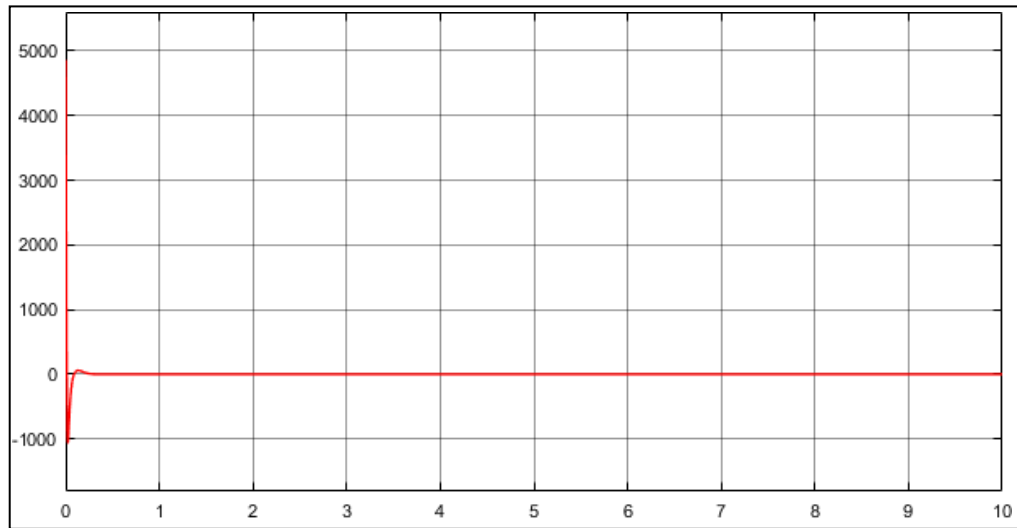


Figura 216 Error lazo interno. Autoría propia

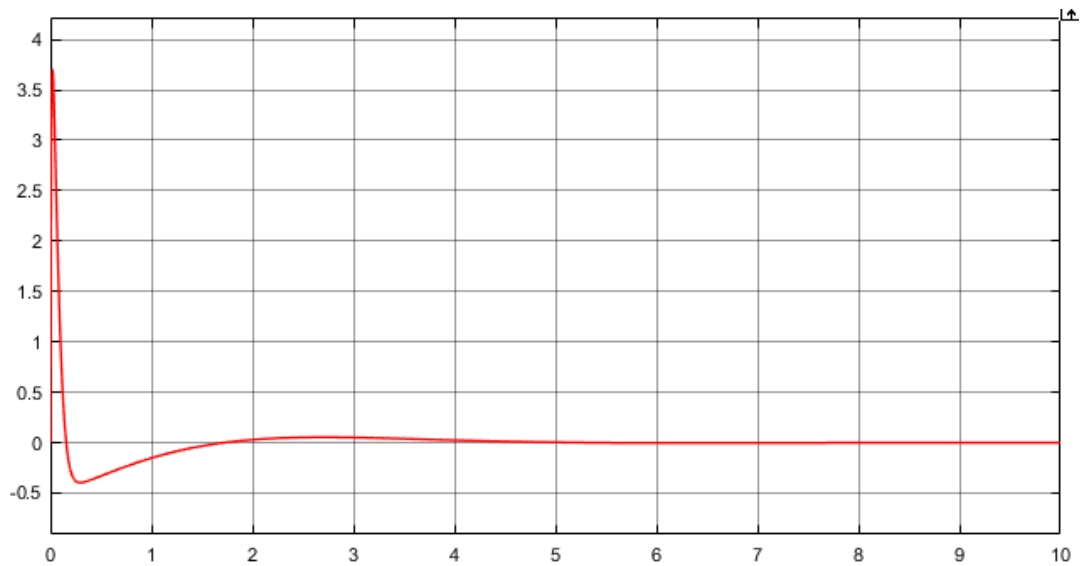


Figura 217 error lazo externo. Autoría propia

9.2.2.3.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método manual

- Condiciones normales

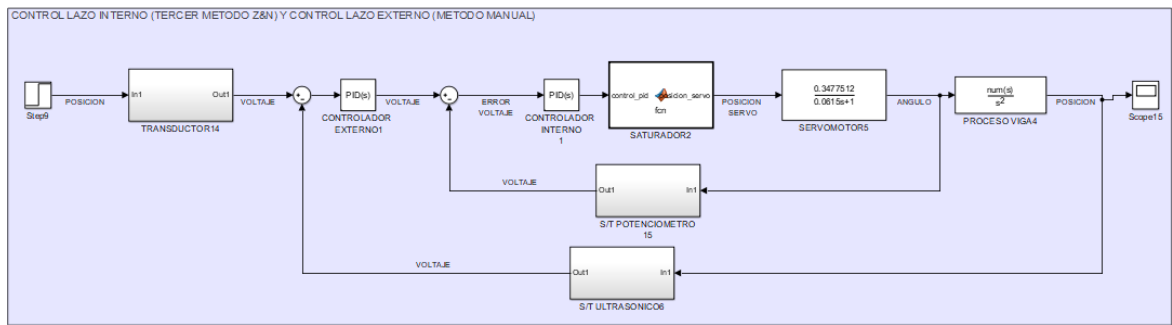


Figura 218 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia

En la figura 219 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

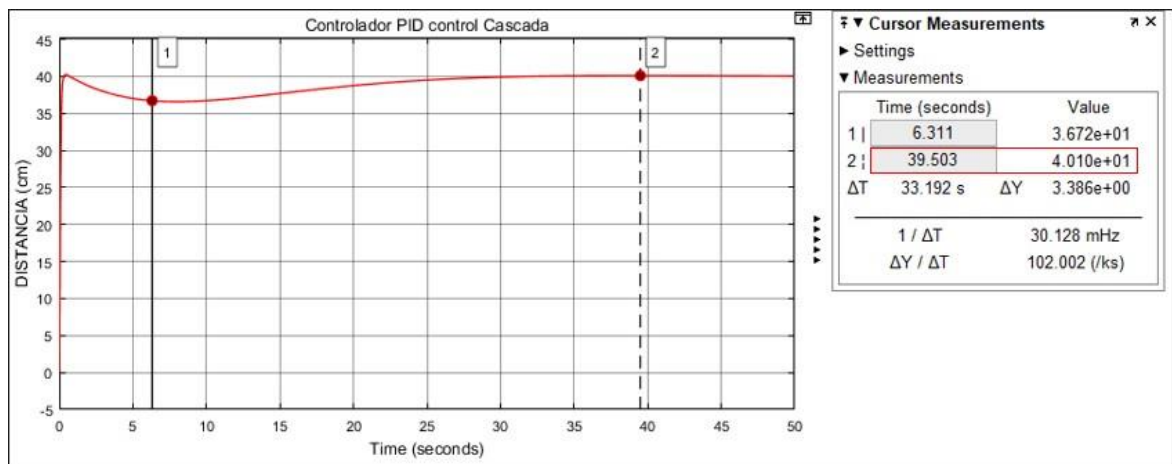


Figura 219 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

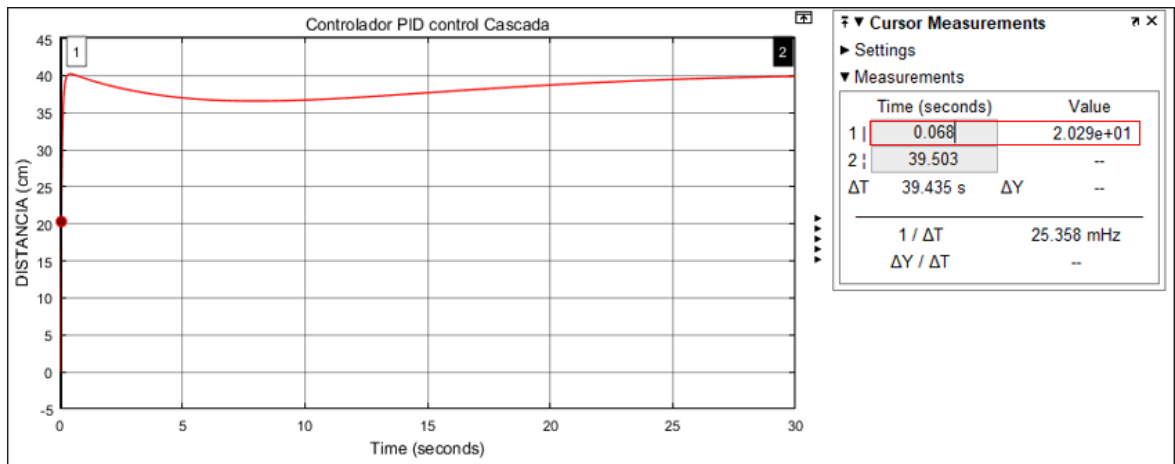


Figura 220 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.068 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

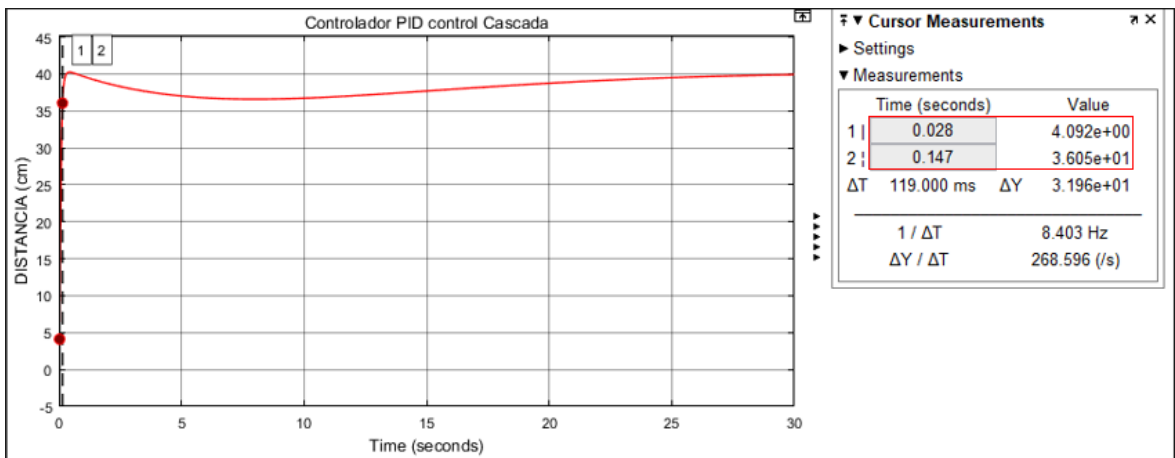


Figura 221 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.147 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.028 segundos

$Tr = 0.147 - 0.028 = 0.119$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

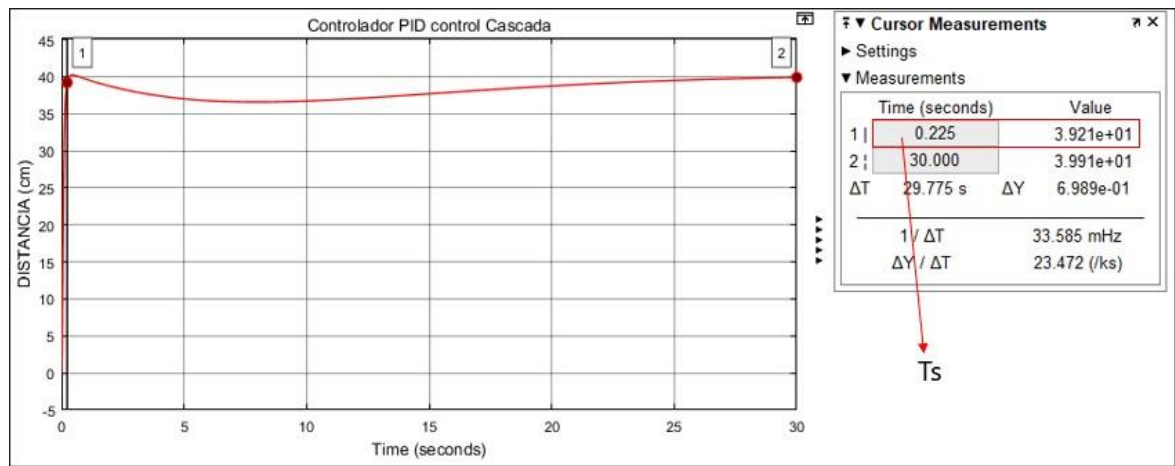


Figura 222 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.225 segundos

- **Ruido**

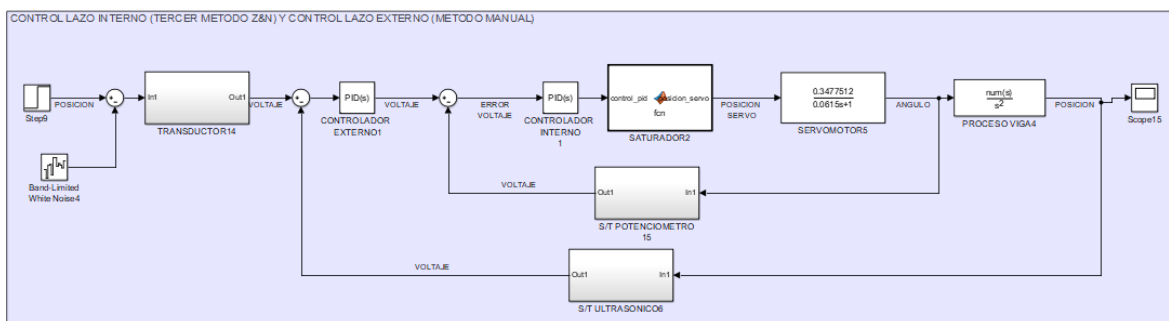


Figura 223 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 224 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

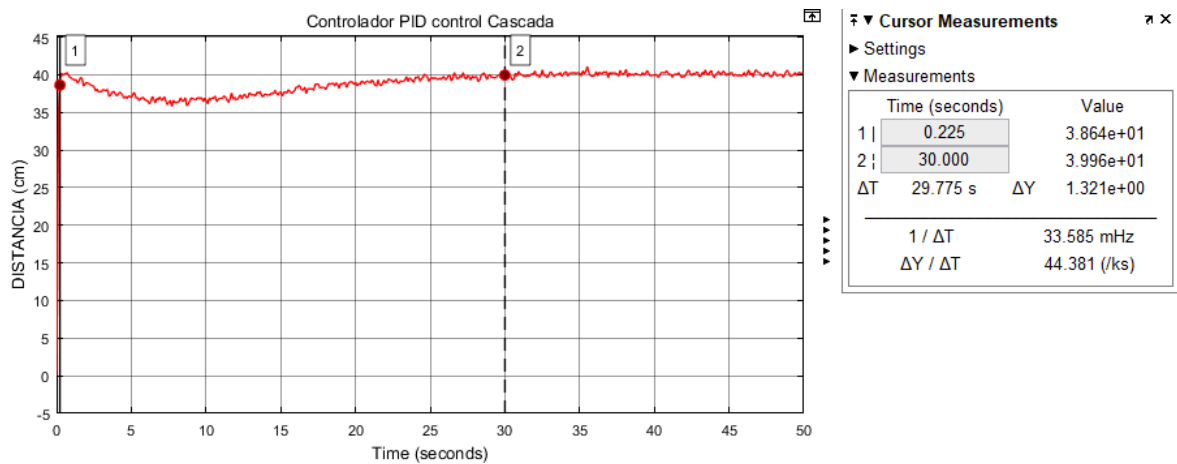


Figura 224 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 40.52 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.3cm

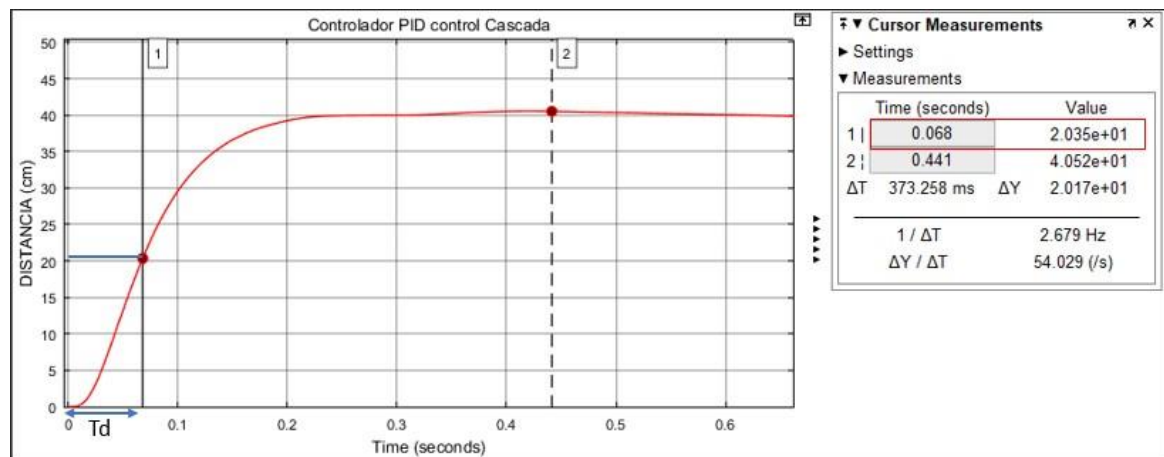


Figura 225 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.068 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36.468cm

10% de VF= 4.052 cm

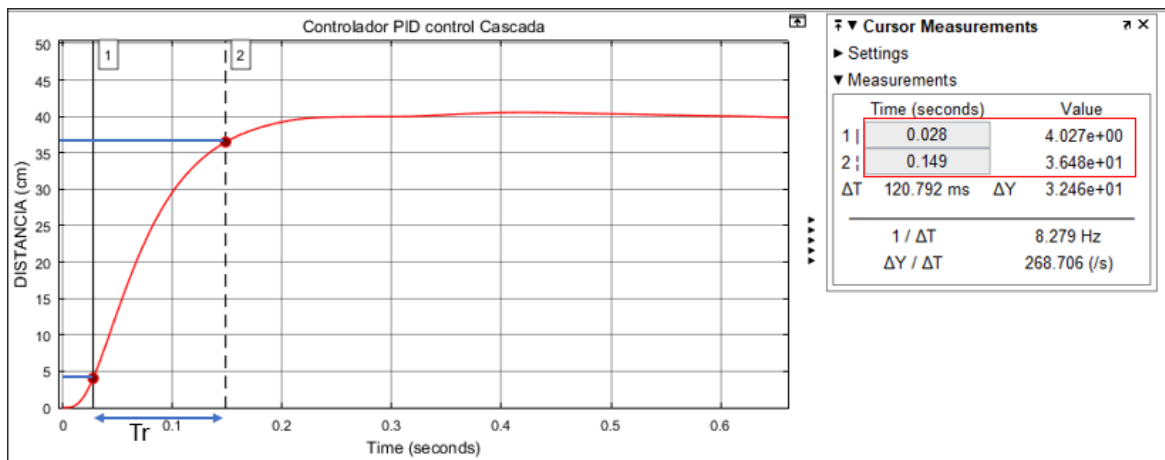


Figura 226 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.149 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.028 segundos

$Tr = 0.149 - 0.028 = 0.121$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.81$$

De esta manera el rango es 40.81 para el límite superior y 39.19 para el límite inferior.

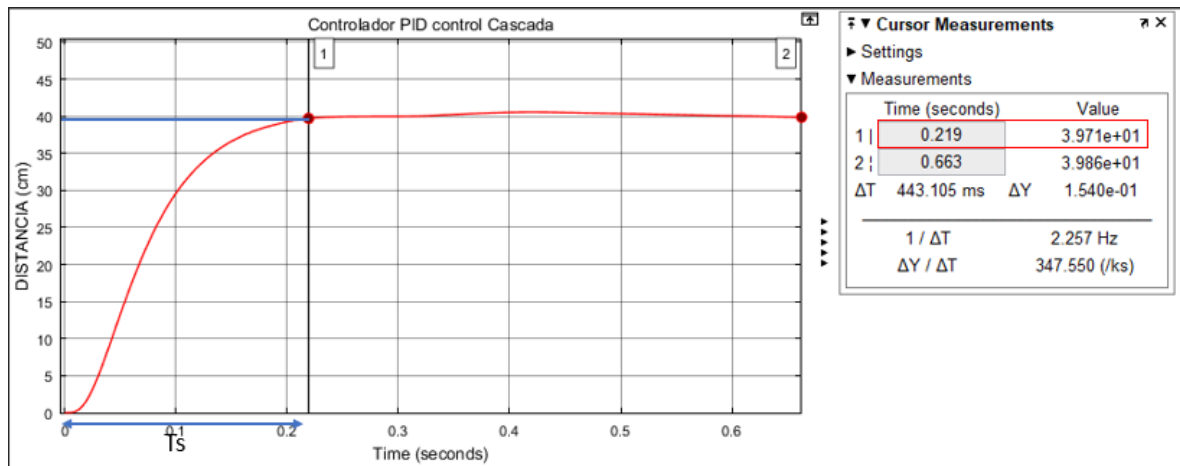


Figura 227 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.219 segundos

9.2.2.3.2. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método manual

- Ruido

En la figura 228 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 229 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

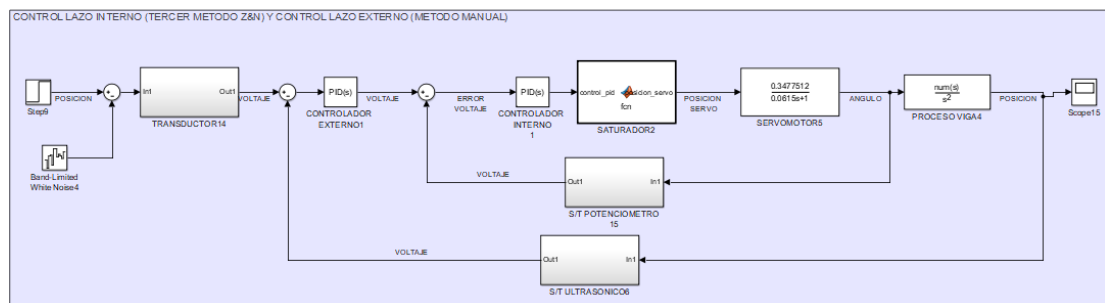


Figura 228 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

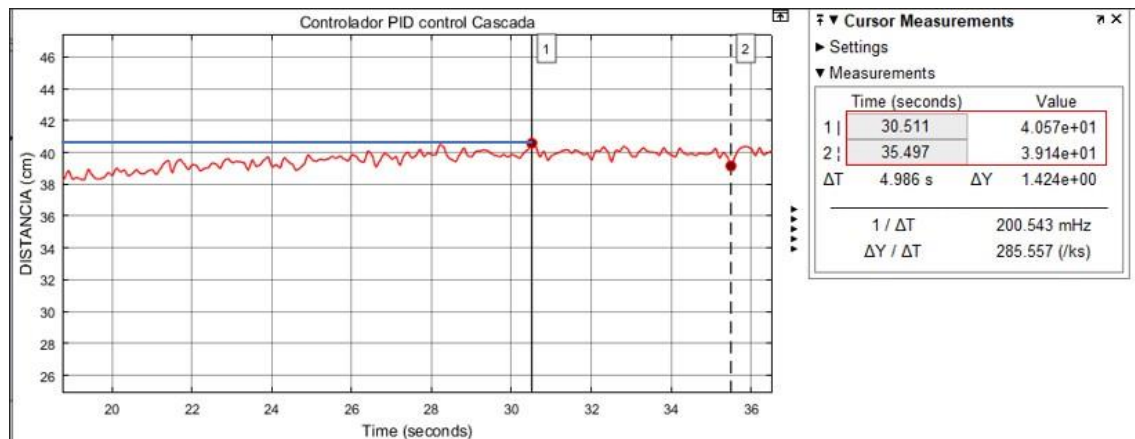


Figura 229 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 230 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 231 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

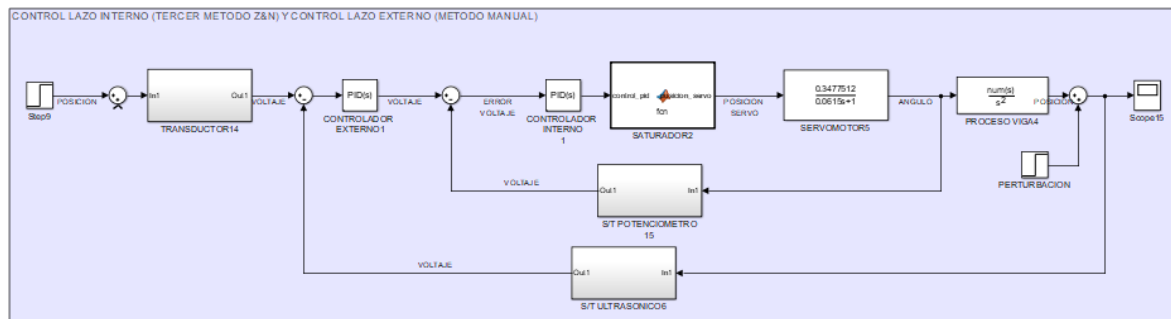


Figura 230 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 231 el controlador logra atenuar en un 100%

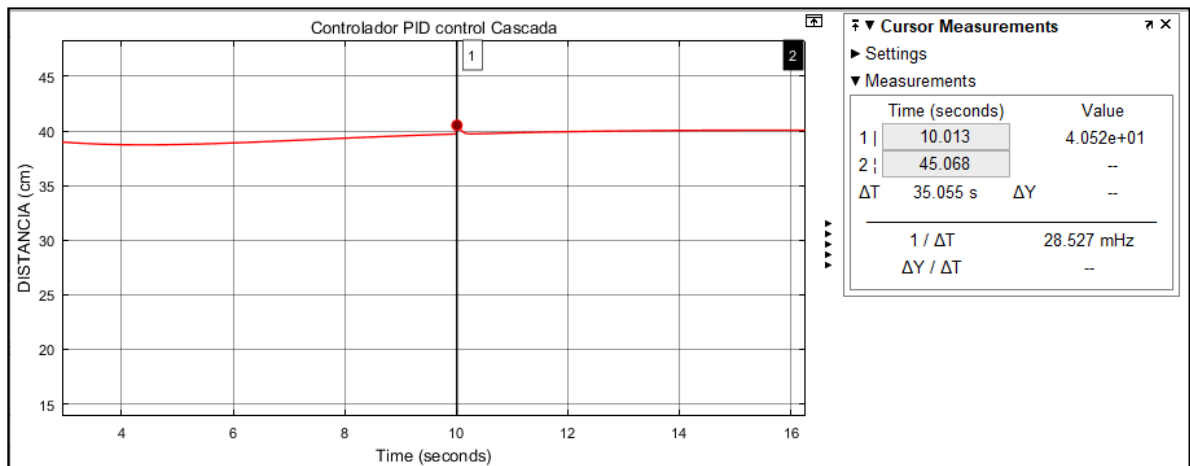


Figura 231 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.2.2.3.3. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método tuning

- Condiciones normales

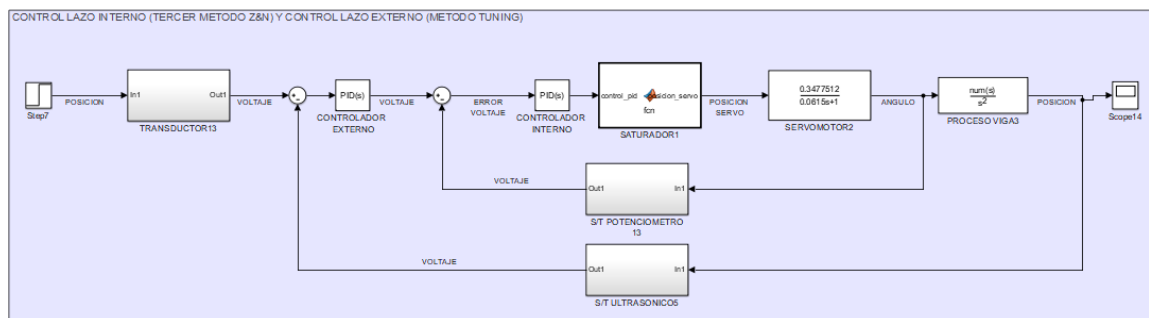


Figura 232 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia

En la figura 233 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

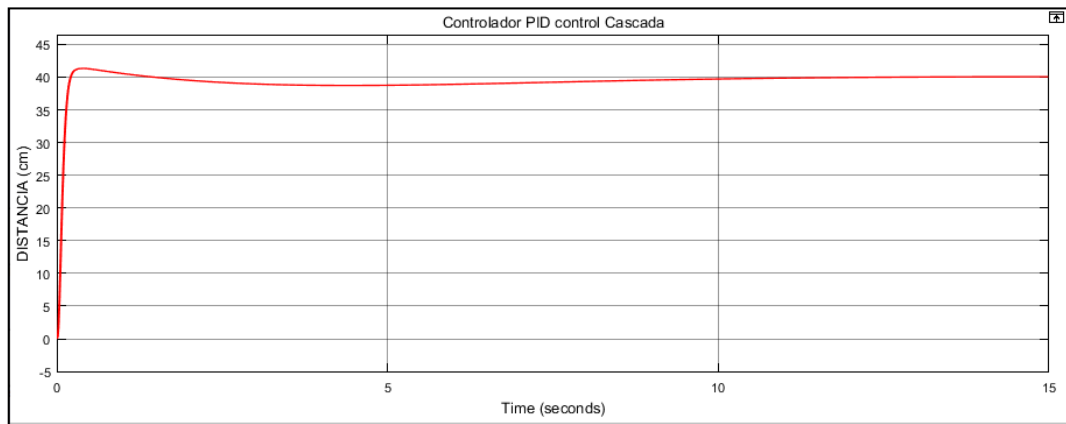


Figura 233 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

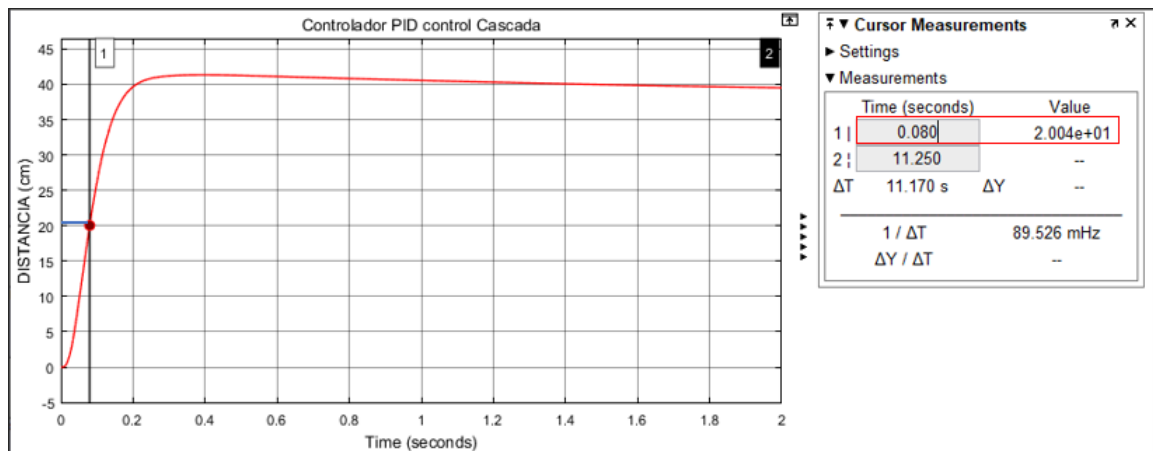


Figura 234 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =2.004 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

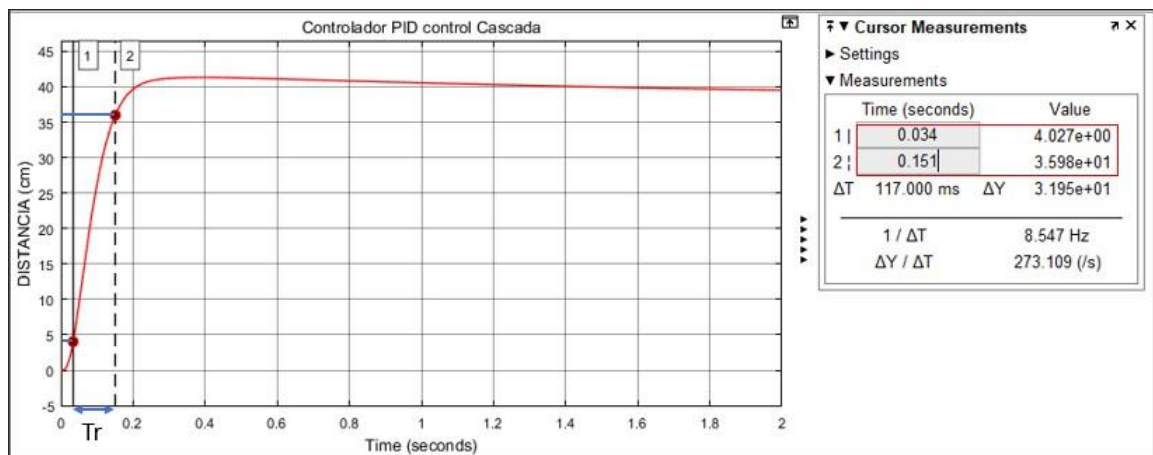


Figura 235 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.151 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.034 segundos

$T_r = 0.151 - 0.034 = 0.117$ segundos

➤ **Tp:**

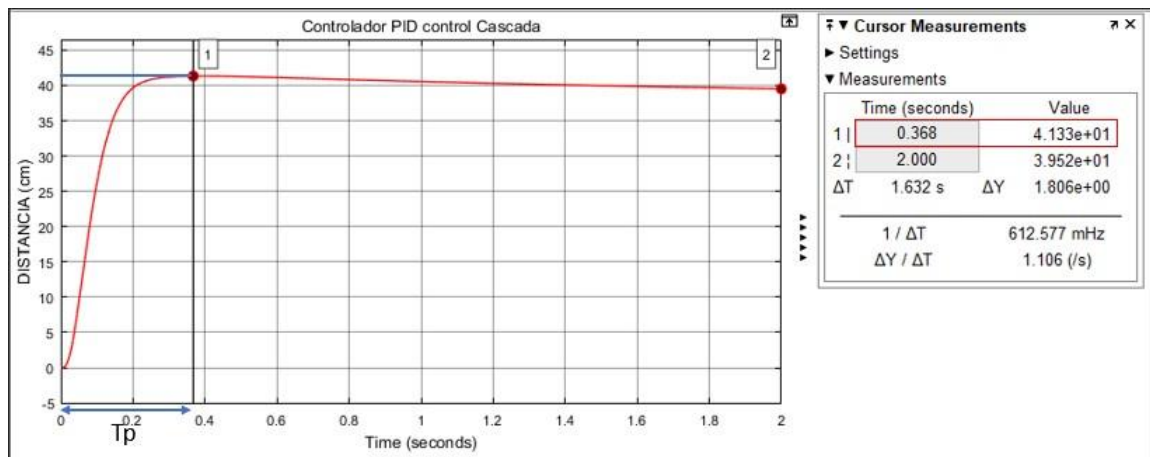


Figura 236 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.368$ segundos.

➤ **Mp:**

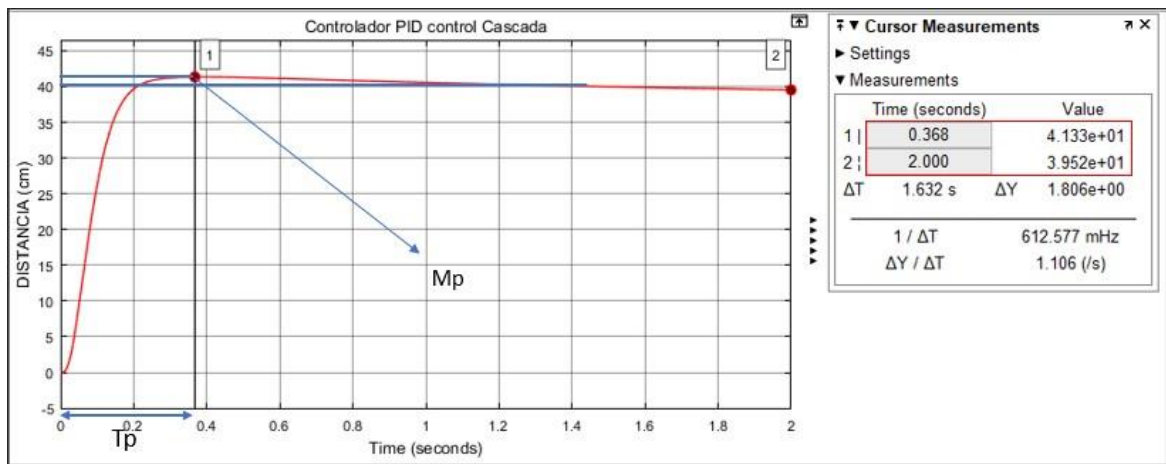


Figura 237 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 41.33 - 40 = 1.33$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

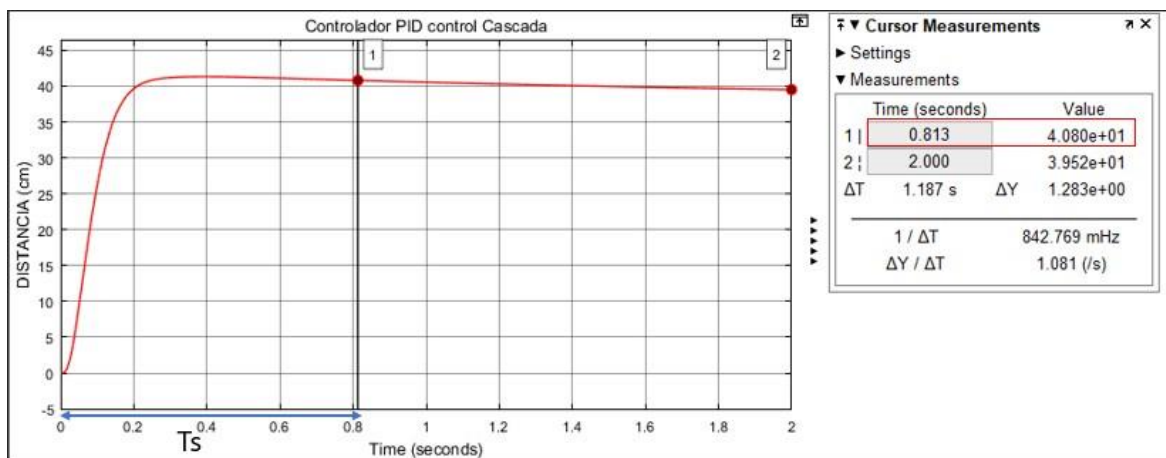


Figura 238 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.813 segundos

- Ruido

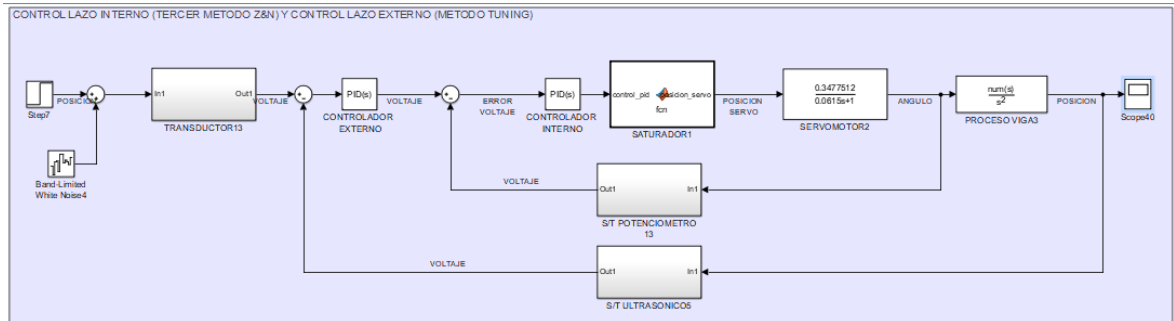


Figura 239 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 240 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

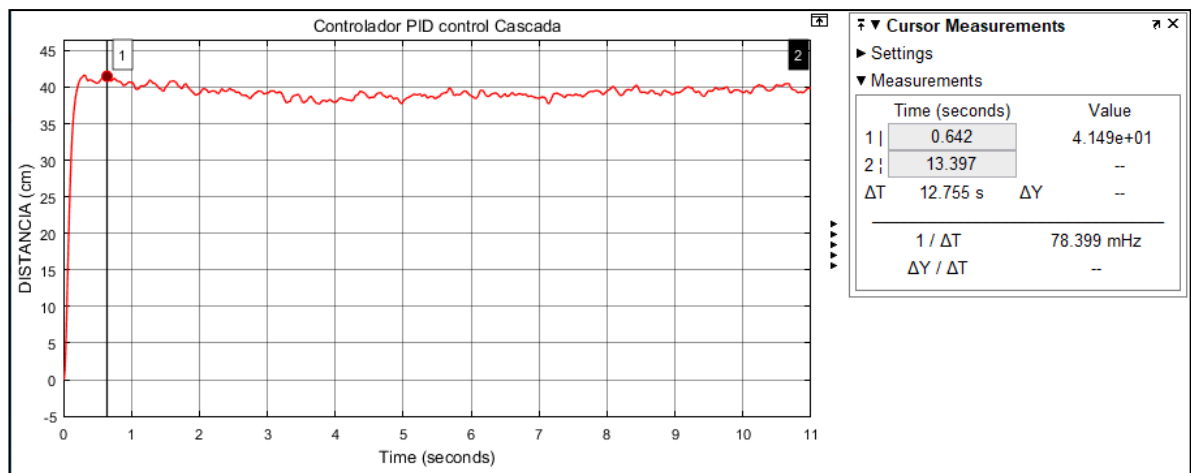


Figura 240 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 40.49 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.25cm

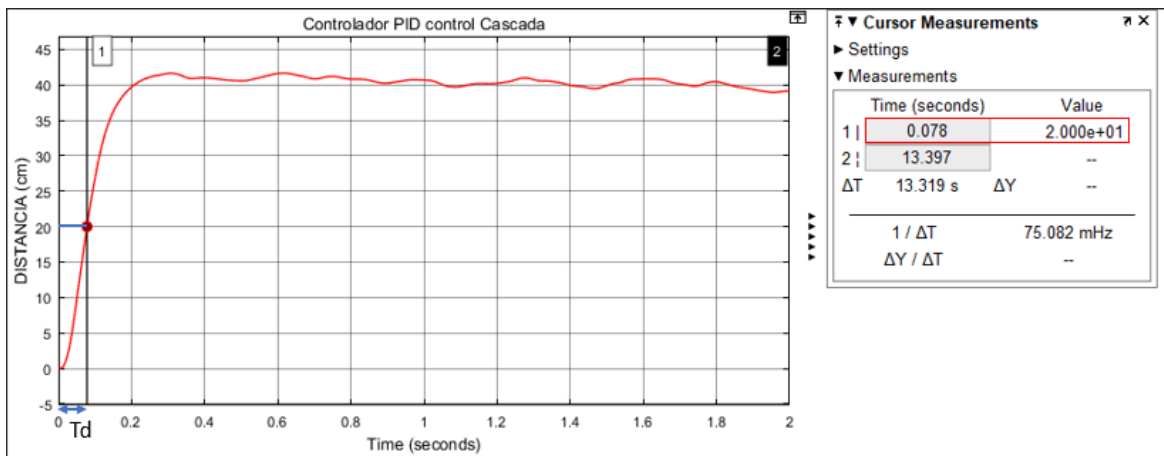


Figura 241 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.078 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 37.34cm

10% de VF= 4.149 cm

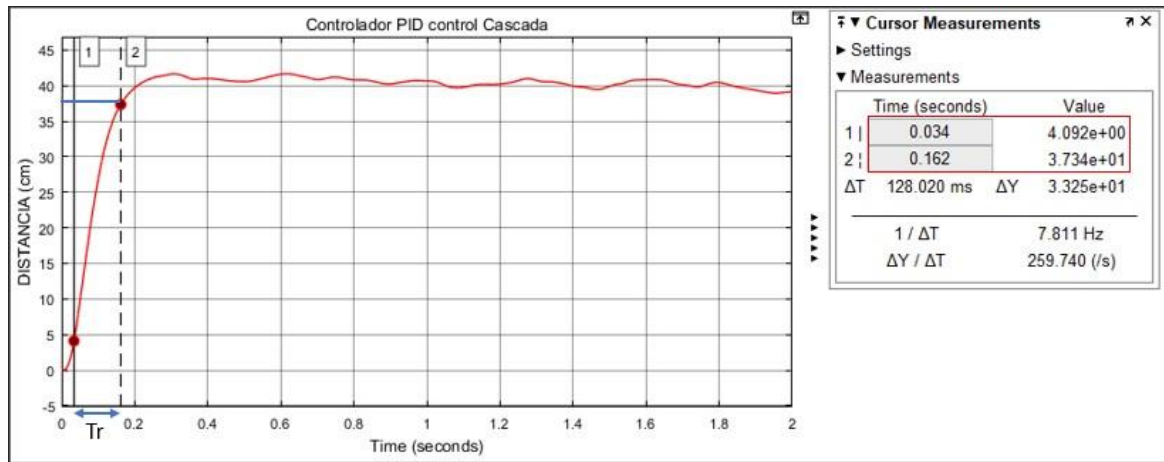


Figura 242 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.162 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.034 segundos

$Tr = 0.162 - 0.034 = 0.128$ segundos

➤ **Tp:**

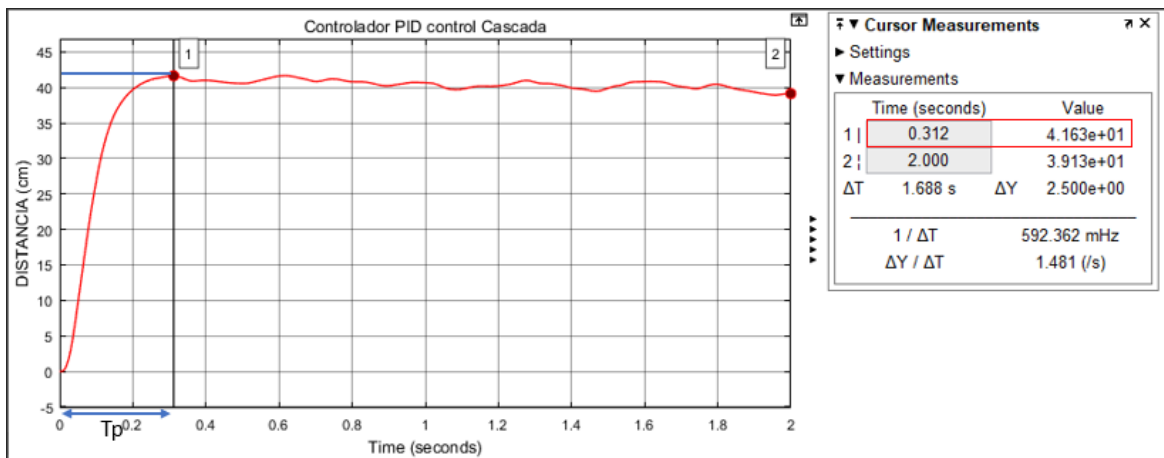


Figura 243 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.312$ segundos

➤ **Mp:**

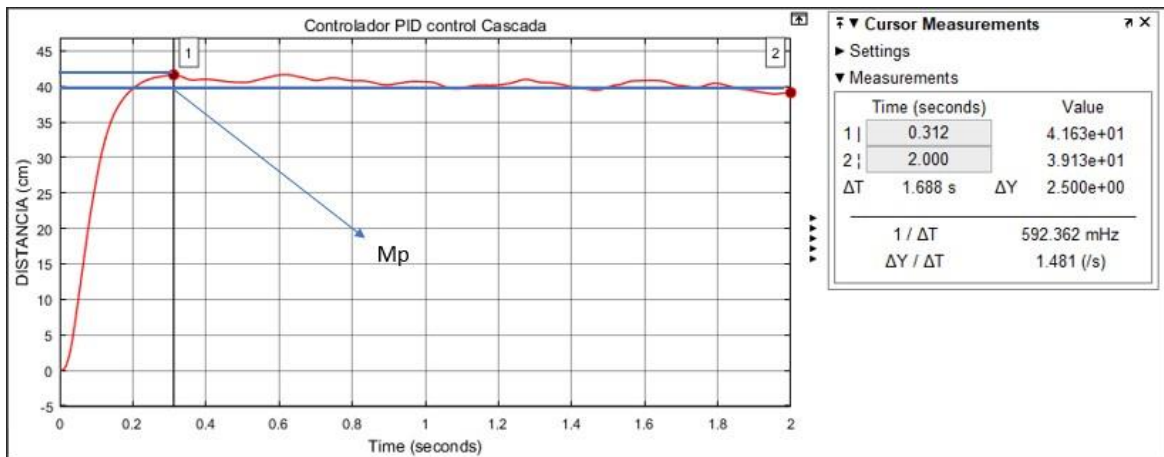


Figura 244 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$M_p = 41.63 - 39.01 = 2.63$ cm

➤ **Ts:**

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.83$$

De esta manera el rango es 40.83 para el límite superior y 39.17 para el límite

Inferior.

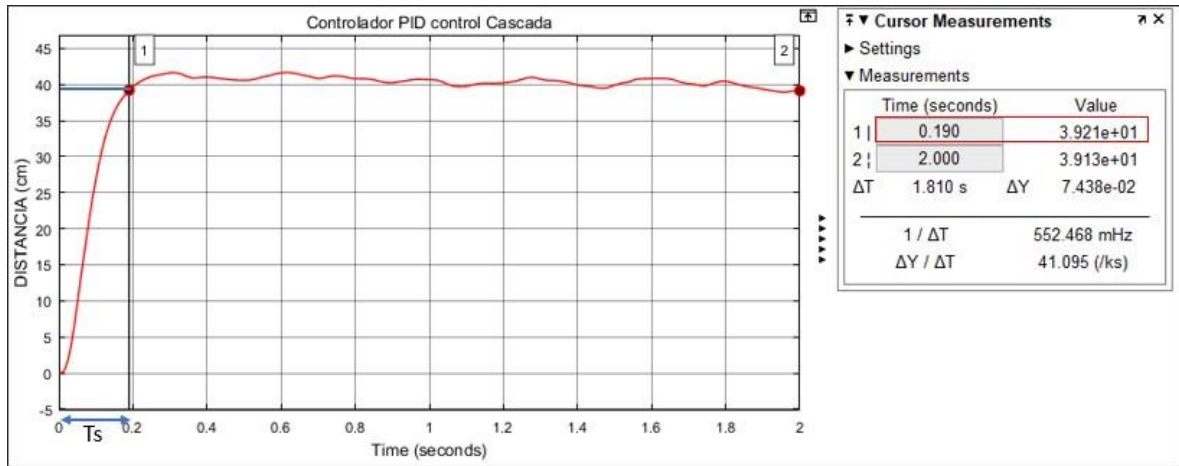


Figura 245 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.190 segundos

9.2.2.3.4. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método Tuning

- Ruido

En la figura 246 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 247 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

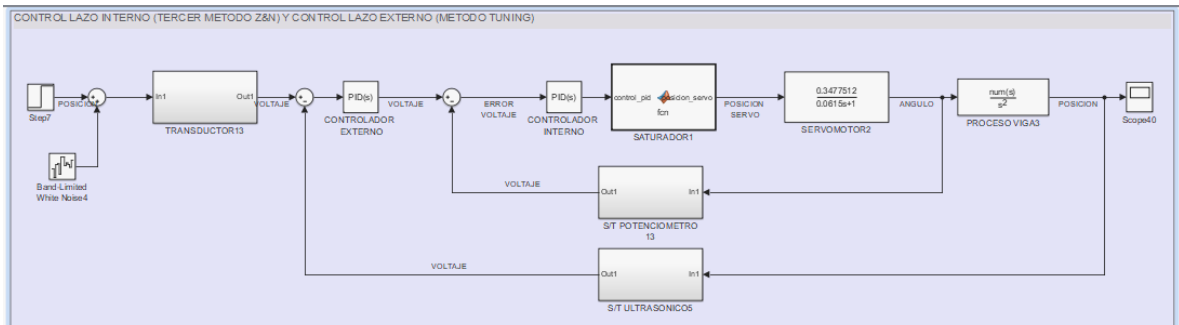


Figura 246 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

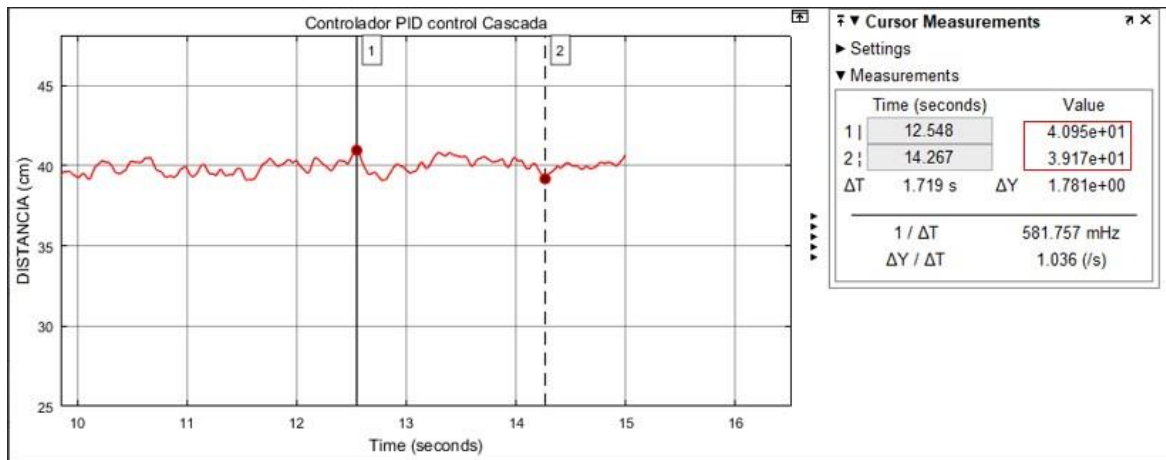


Figura 247 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 248 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 249 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

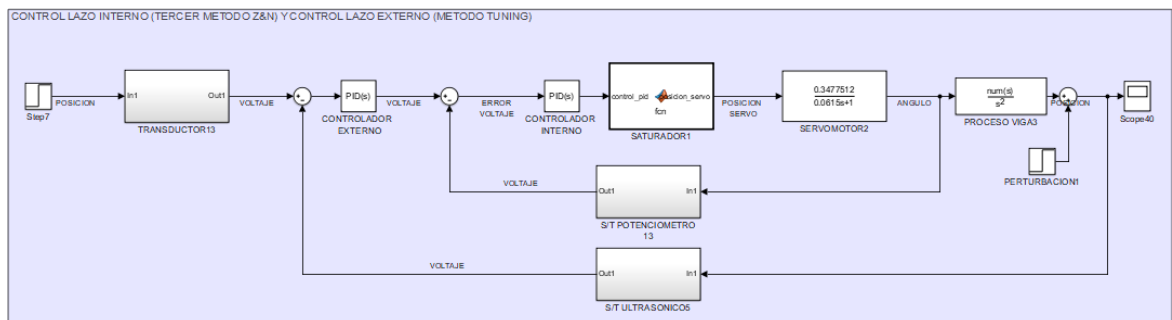


Figura 248 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 249 el controlador logra atenuar en un 100% la perturbación en un tiempo corto.

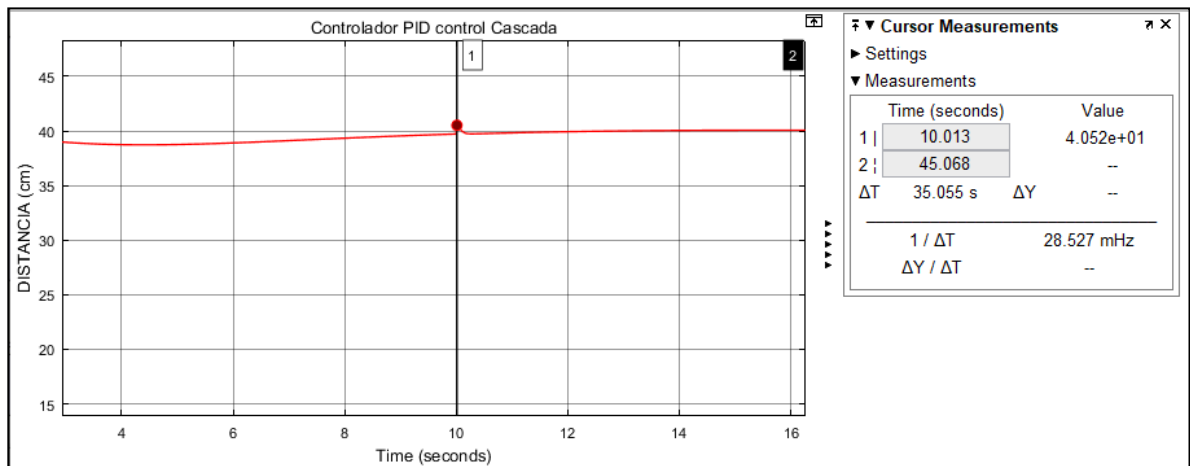


Figura 249 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.2.2.3.5. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID Control de lazo interno por método de Dahlin y lazo externo por método manual

- Condiciones normales

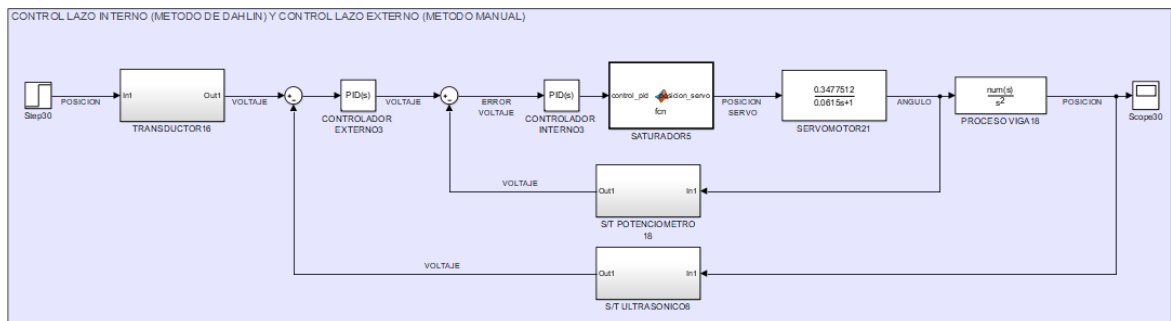


Figura 250 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia

En la figura 251 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

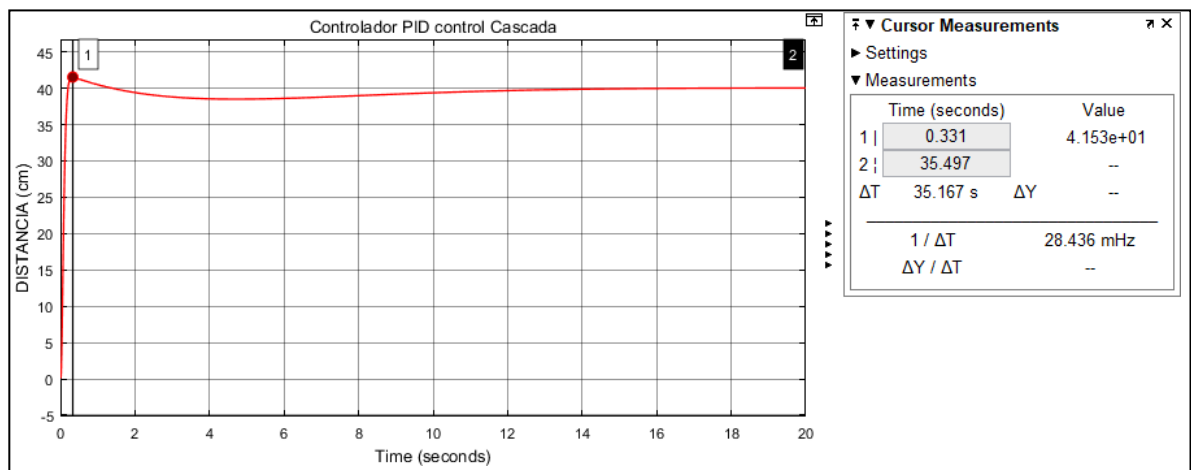


Figura 251 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

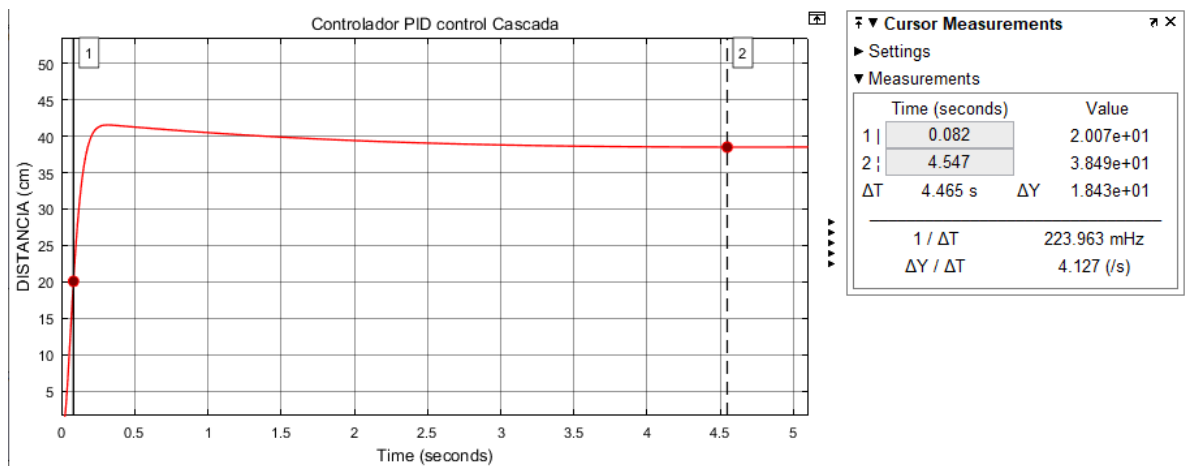


Figura 252 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =0.082 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

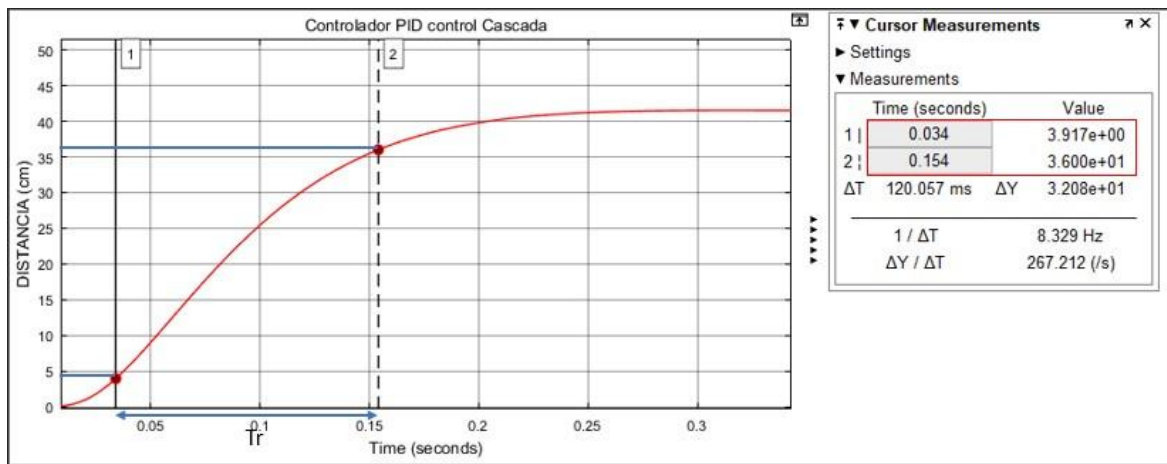


Figura 253 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.154 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.034 segundos

$T_r = 0.154 - 0.034 = 0.12$ segundos

➤ **Tp:**

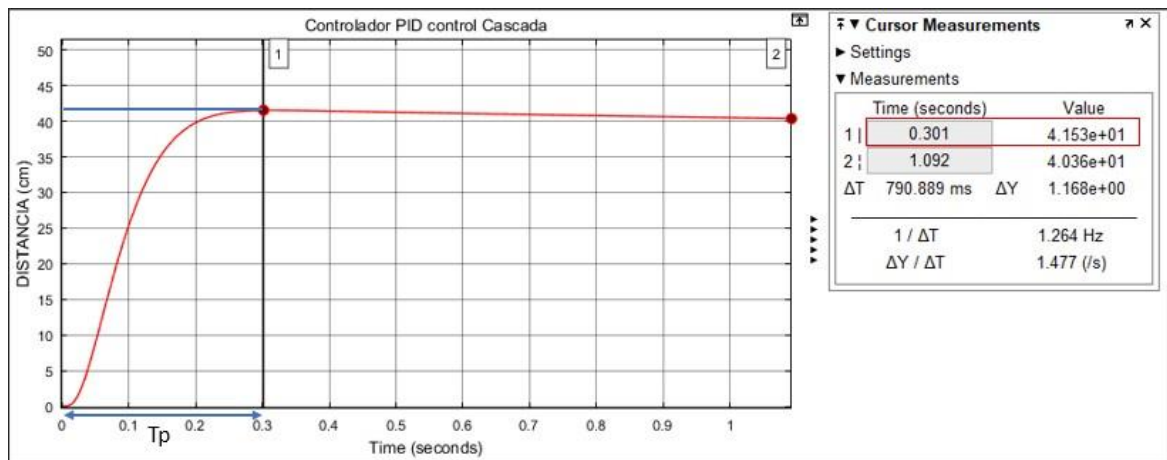


Figura 254 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

➤ **Mp:**

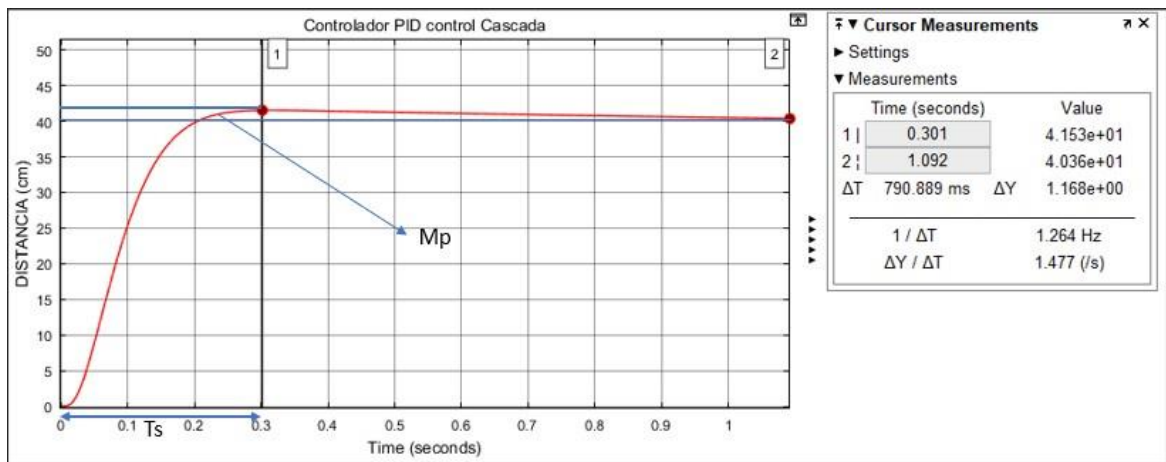


Figura 255 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

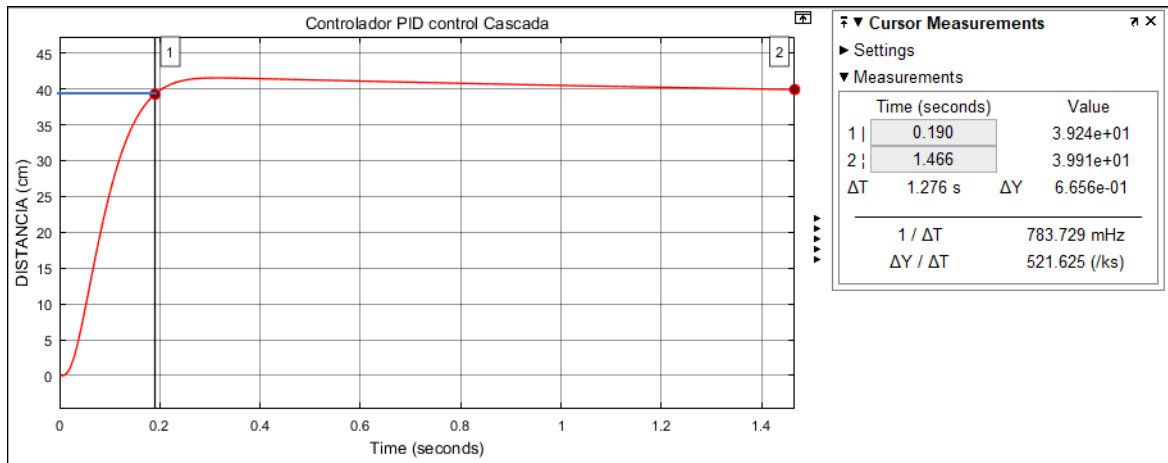


Figura 256 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.192 segundos

- Ruido

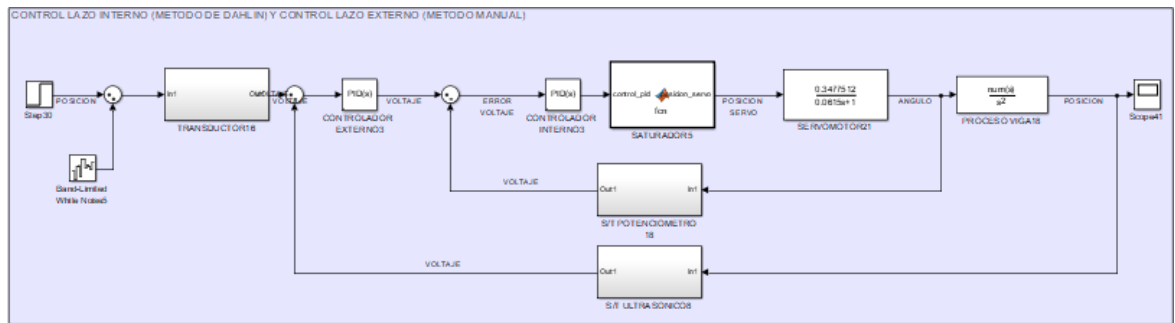


Figura 257 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 258 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

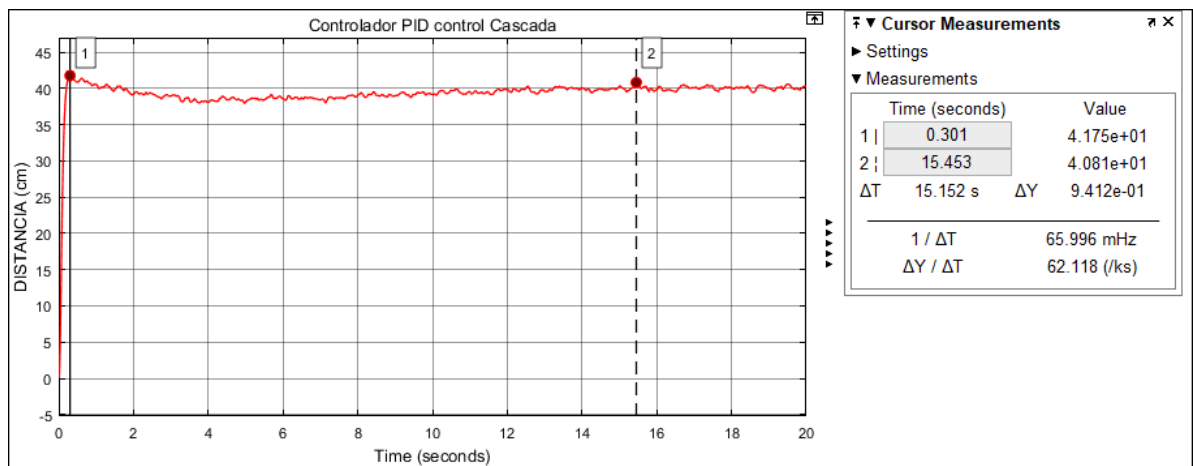


Figura 258 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 40.81 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.4cm

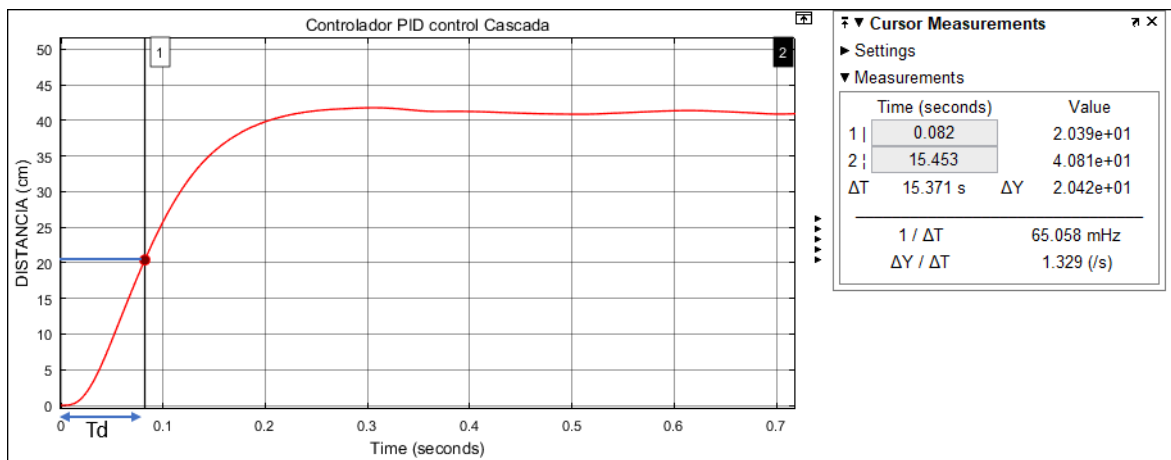


Figura 259 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.082 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36.729cm

10% de VF= 4.081 cm

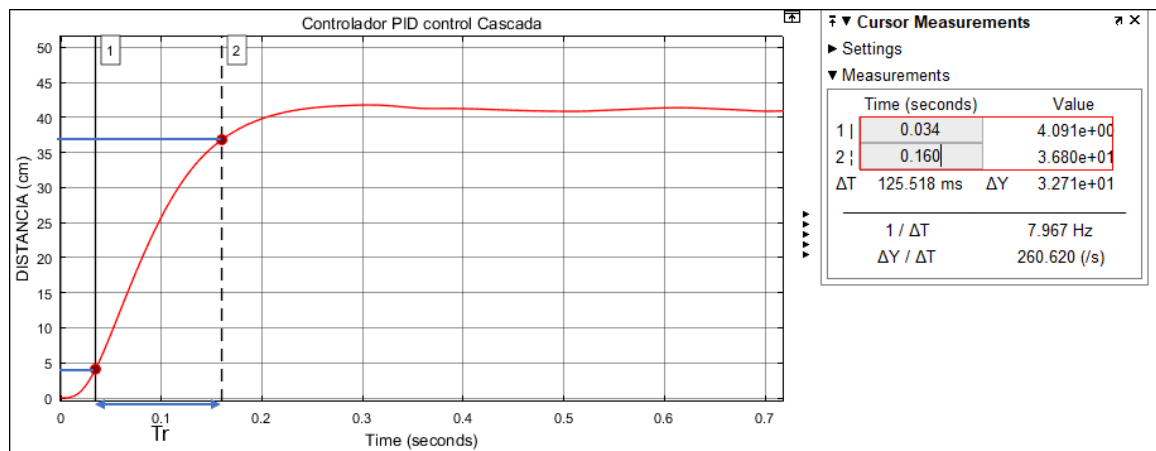


Figura 260 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.160 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.034 segundos

$Tr = 0.160 - 0.034 = 0.126$ segundos

➤ **Tp:**

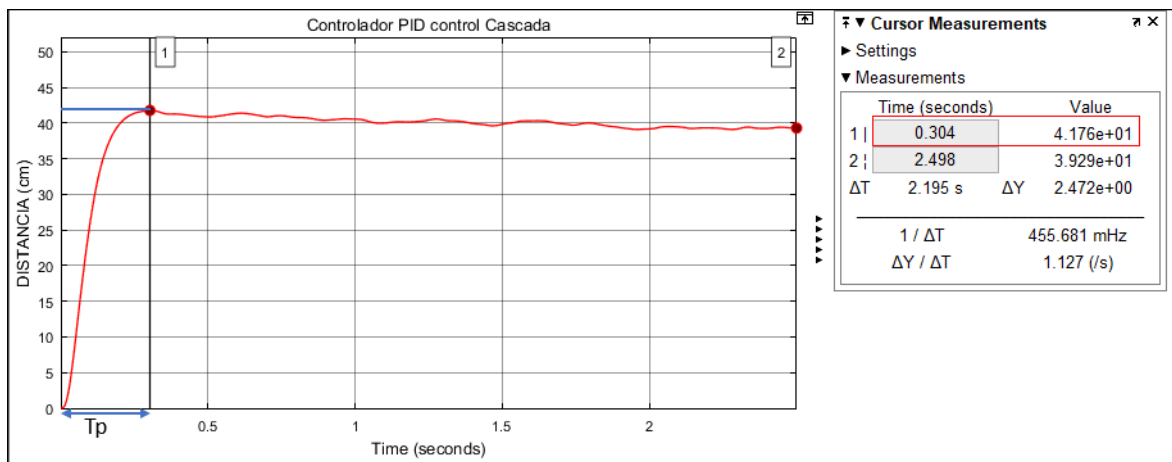


Figura 261 Tiempo pico Control cascada. Autoría propia

➤ **Mp:**

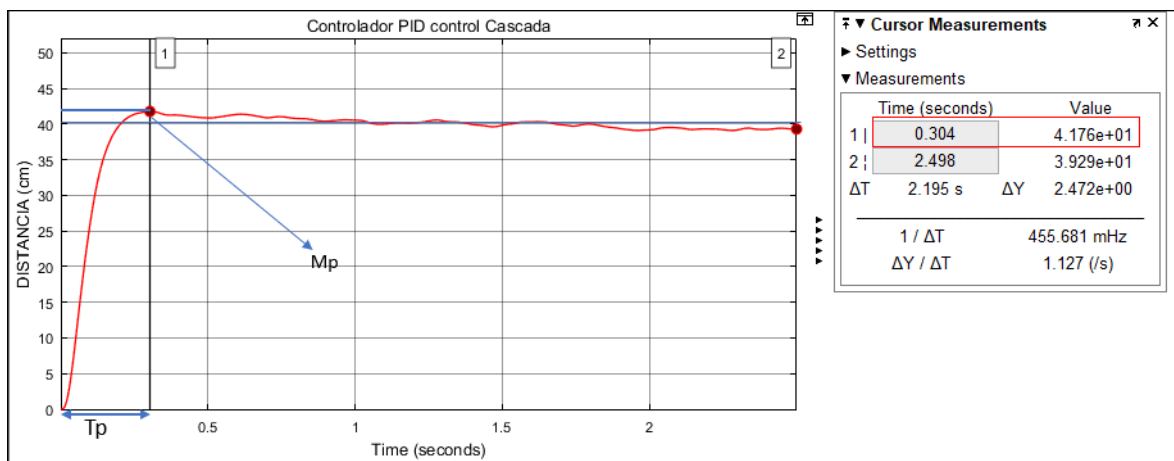


Figura 262 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 41.76 - 40 = 1.76$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

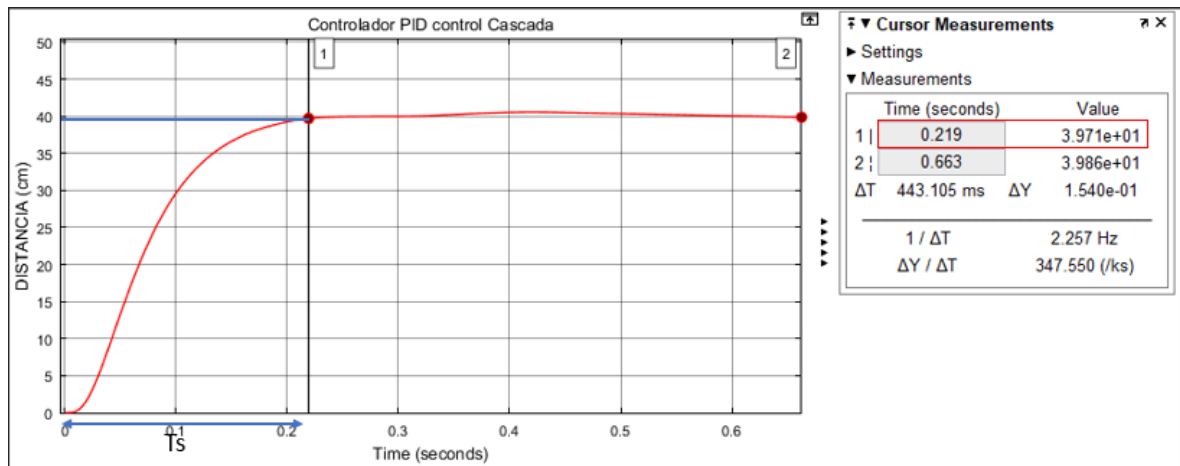


Figura 263 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.219 segundos

9.2.2.3.6. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por método DAHLIN Y lazo externo por método manual

- Ruido

En la figura 264 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 265 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

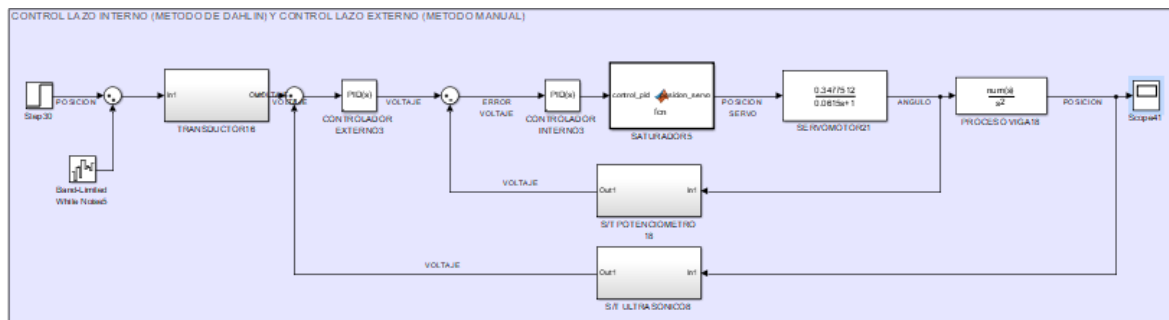


Figura 264 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

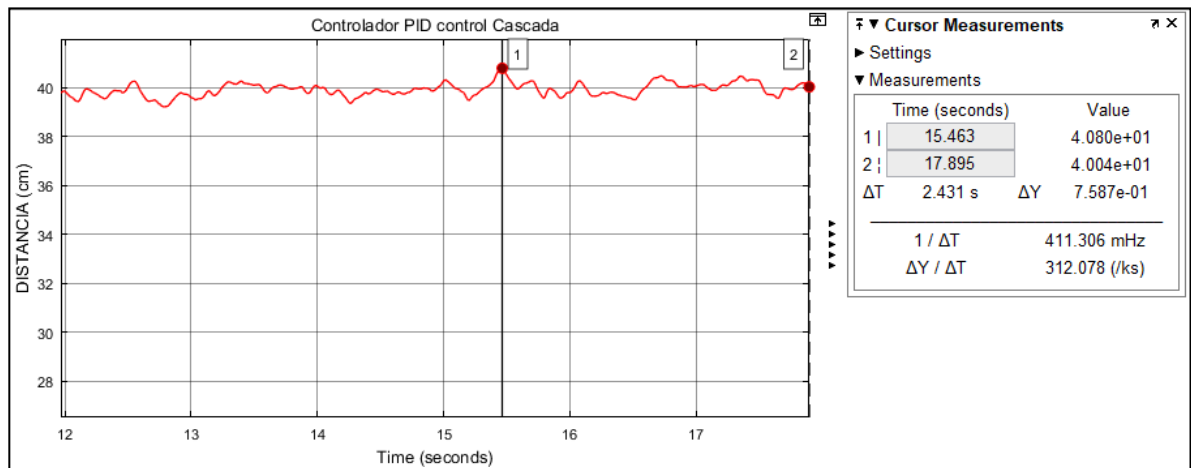


Figura 265 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 266 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 267 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

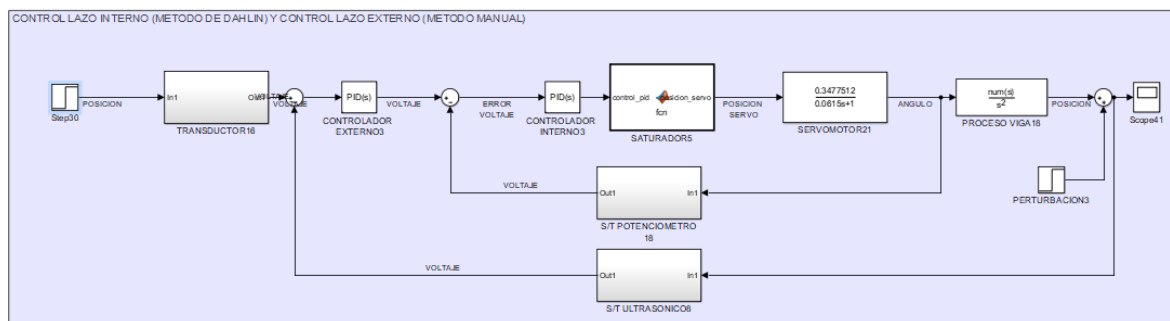


Figura 266 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 267 el controlador no logra atenuar en un 100% la perturbación en un tiempo corto lo que hace al controlador que tenga un tiempo de establecimiento mayor

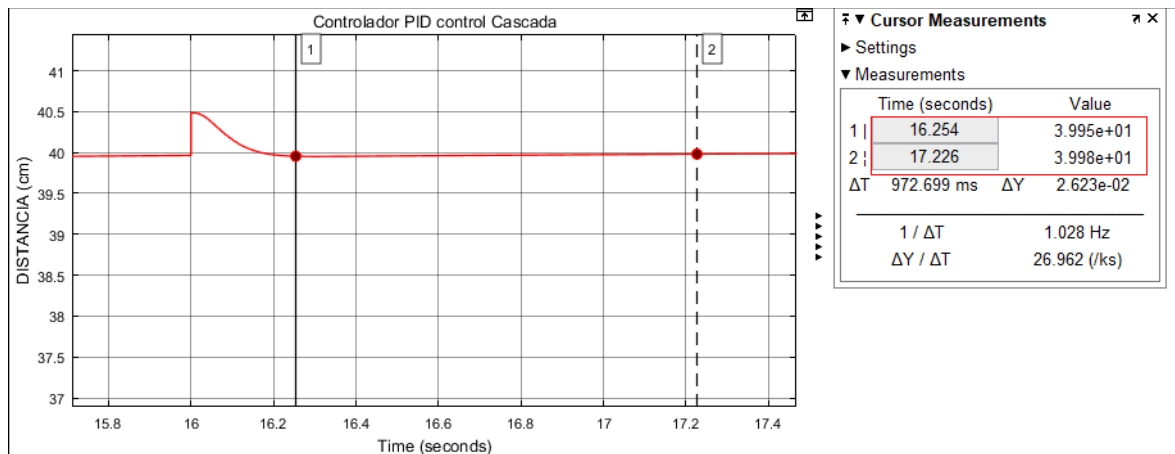


Figura 267 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.2.2.3.7. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de DAHLIN y lazo externo por método tuning

- Condiciones normales

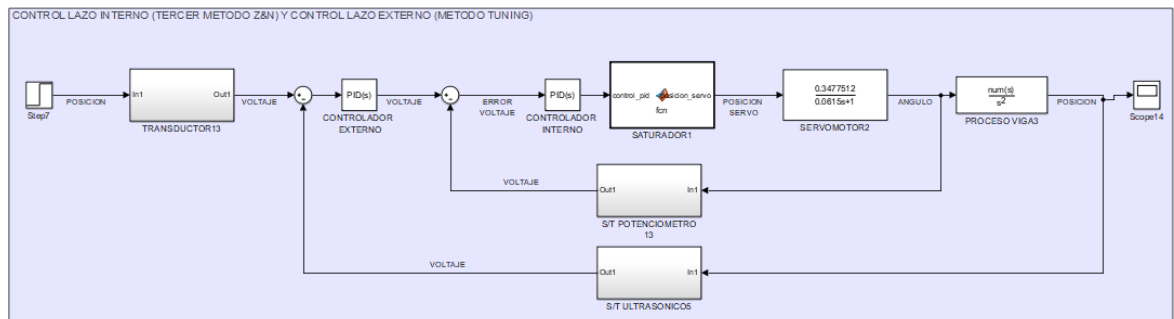


Figura 268 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia

En la figura 269 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

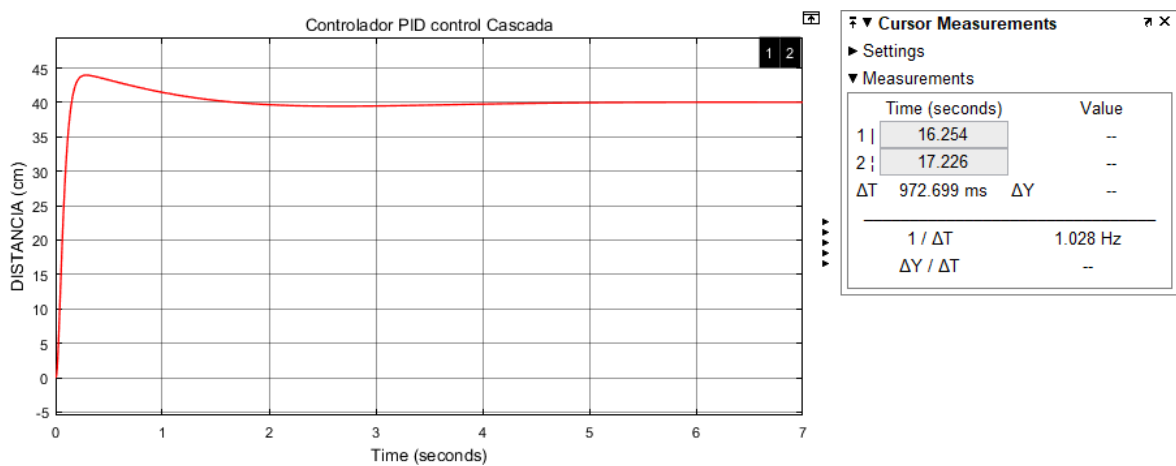


Figura 269 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

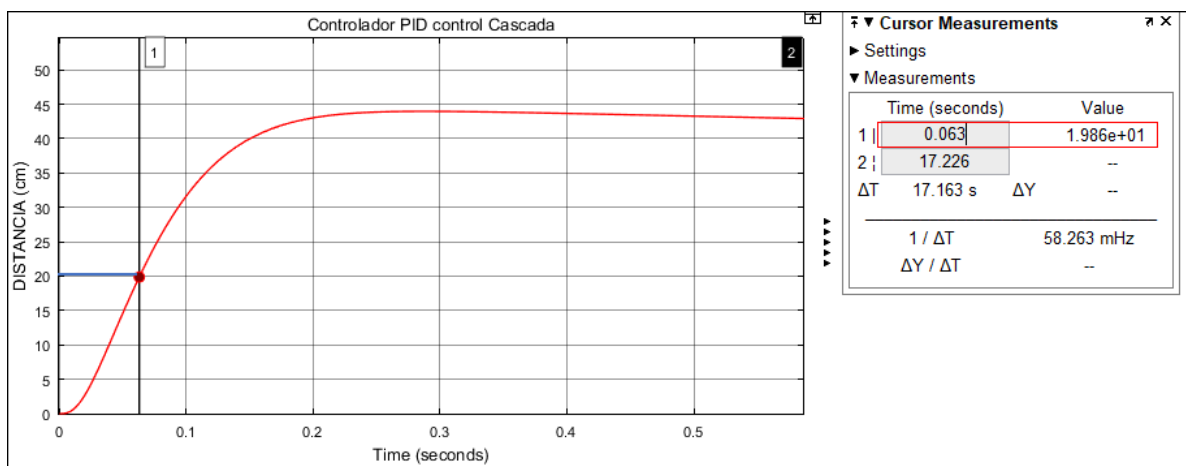


Figura 270 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =1.986 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

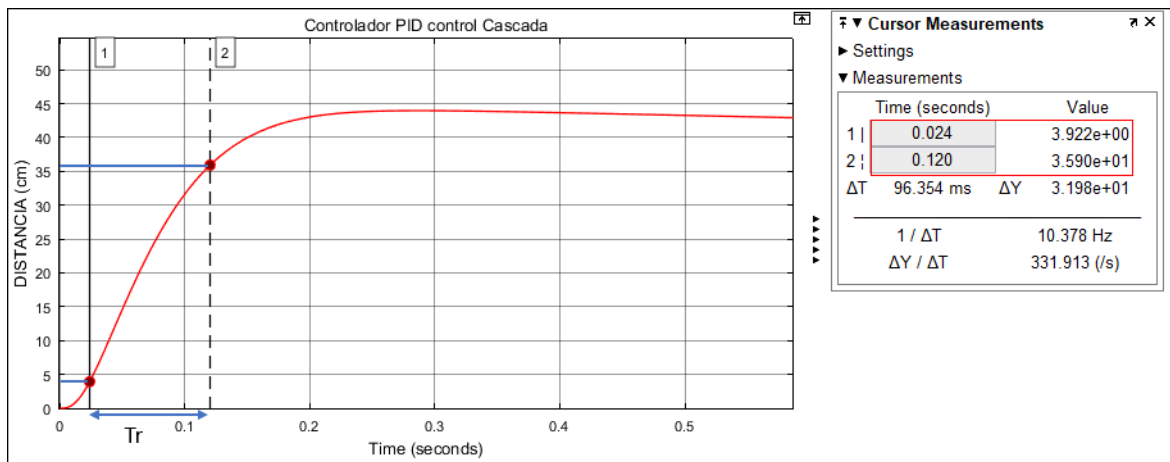


Figura 271 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.120 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.024 segundos

$T_r = 0.120 - 0.024 = 0.096$ segundos

➤ **Tp:**

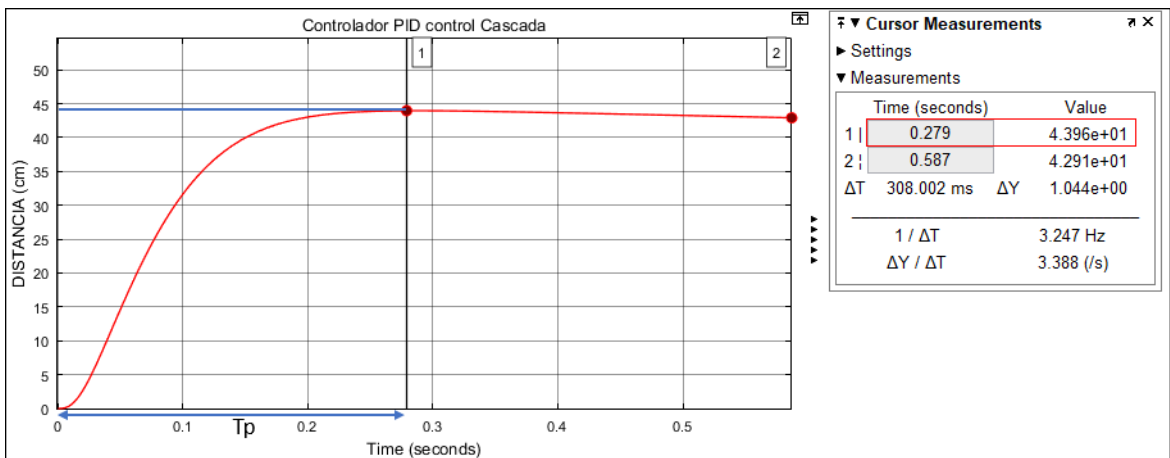


Figura 272 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.279$ segundos.

➤ **Mp:**

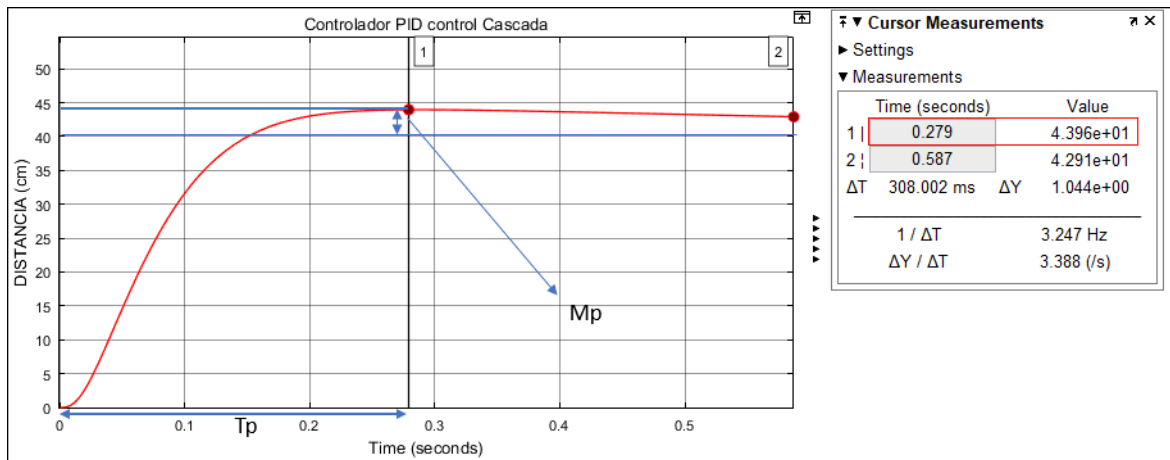


Figura 273 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 43.96 - 40 = 3.96$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

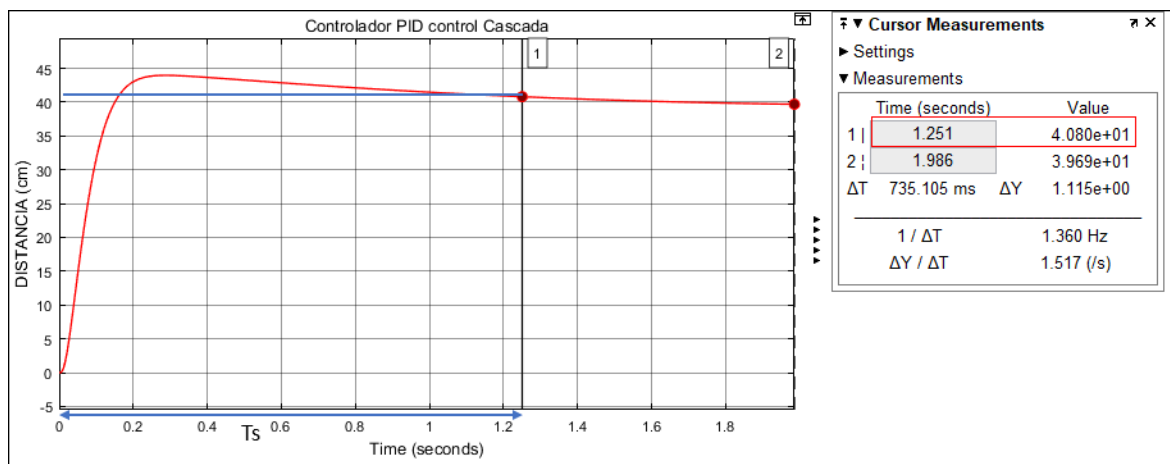


Figura 274 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 1.251 segundos

- Ruido

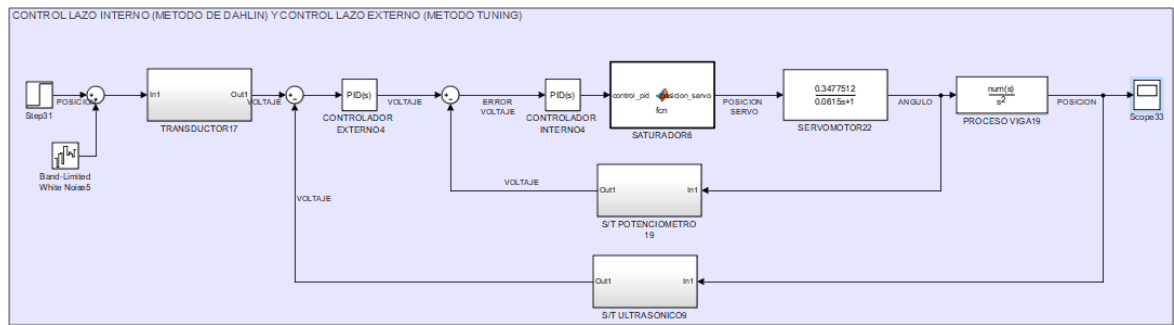


Figura 275 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 276 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

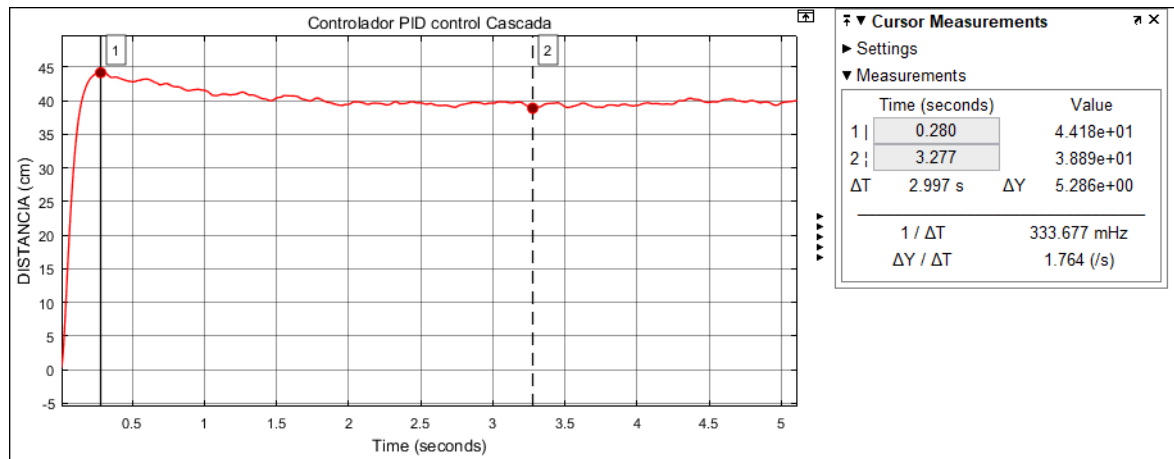


Figura 276 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20cm

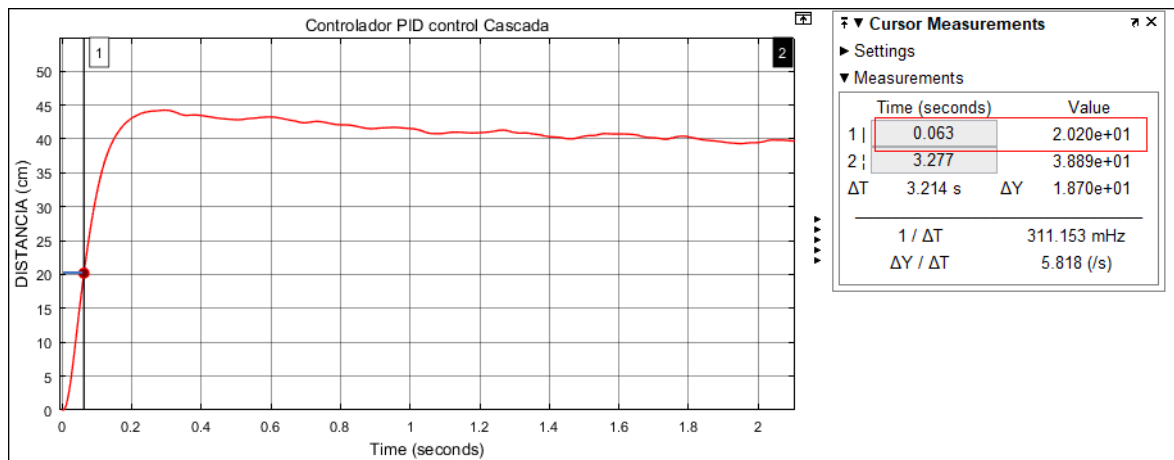


Figura 277 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.063 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

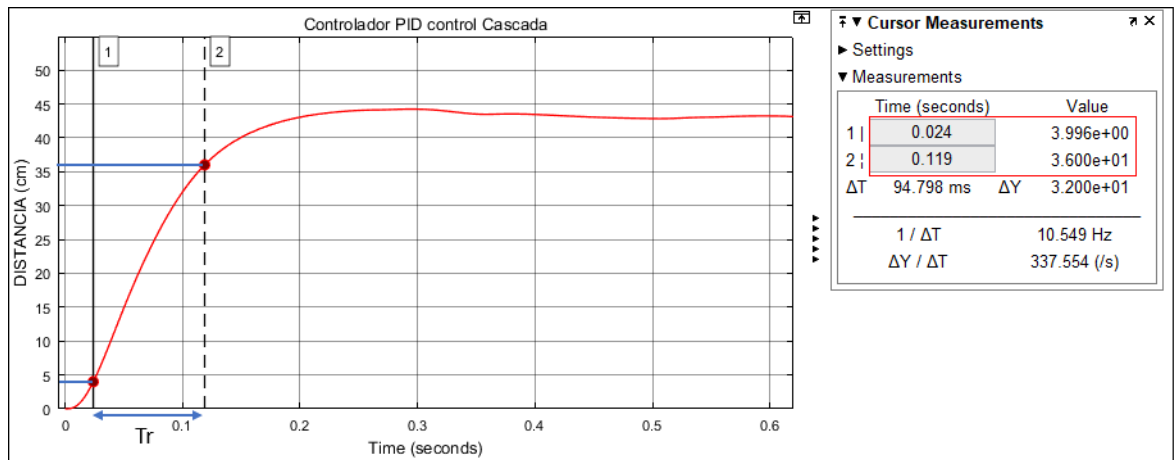


Figura 278 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.119 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.024 segundos

$Tr = 0.119 - 0.024 = 0.095$ segundos

➤ **Tp:**

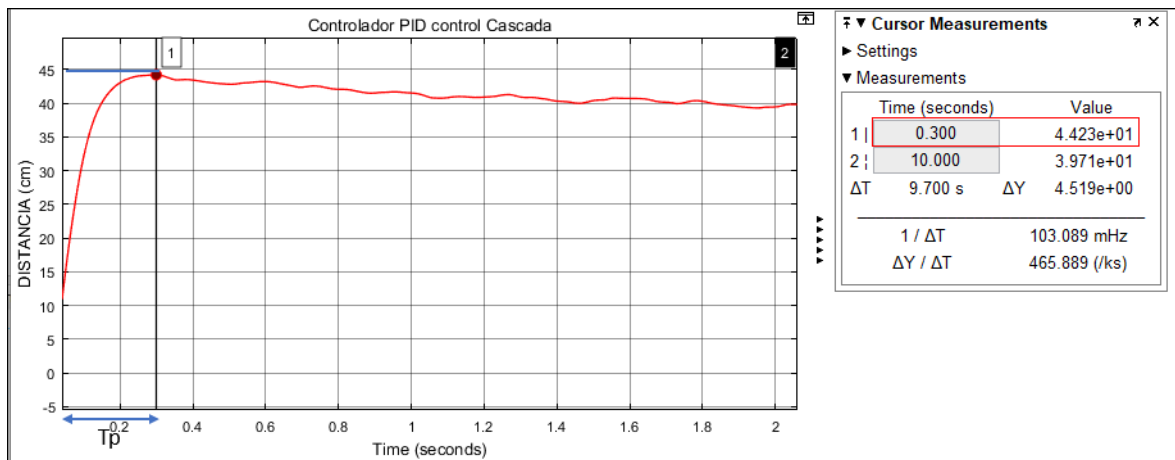


Figura 279 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.300$ segundos

➤ **Mp:**

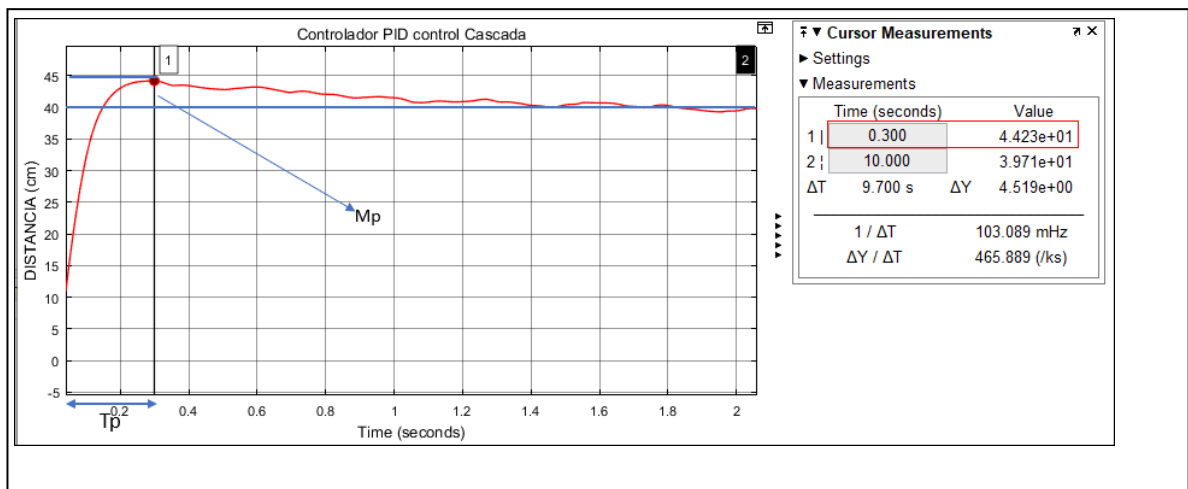


Figura 280 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 44.23 - 40 = 4.23$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

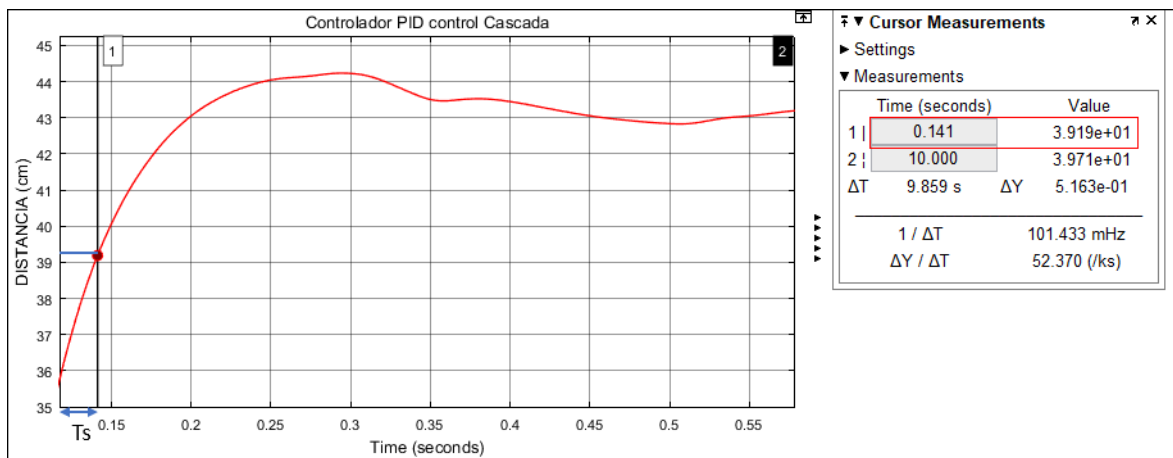


Figura 281 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.141 segundos

9.2.2.3.8. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por DAHLIN y lazo externo por método Tuning

- Ruido

En la figura 282 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 283 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

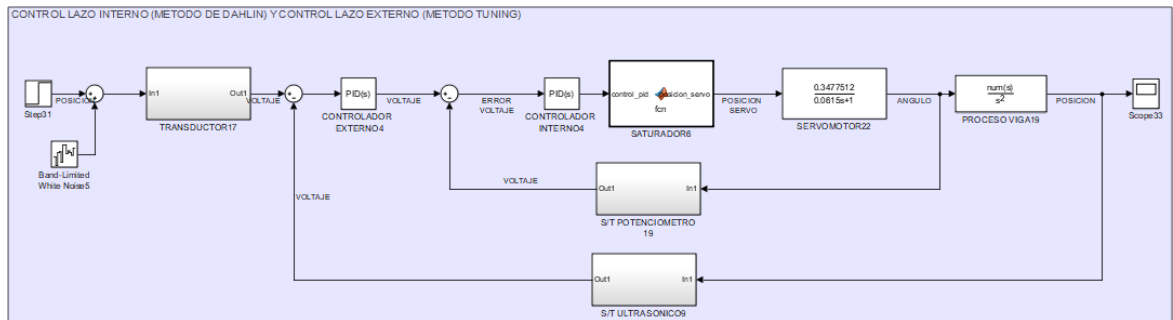


Figura 282 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

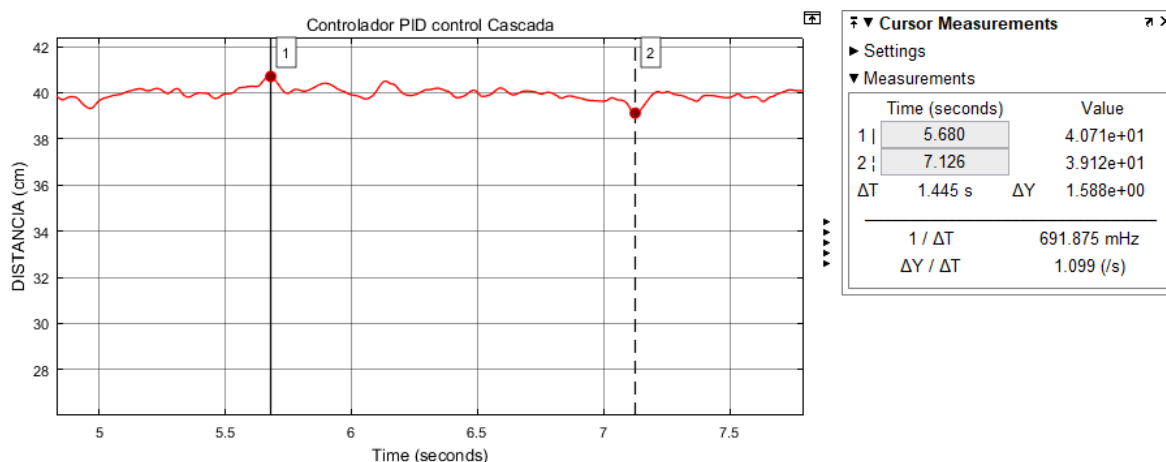


Figura 283 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 284 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 285 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

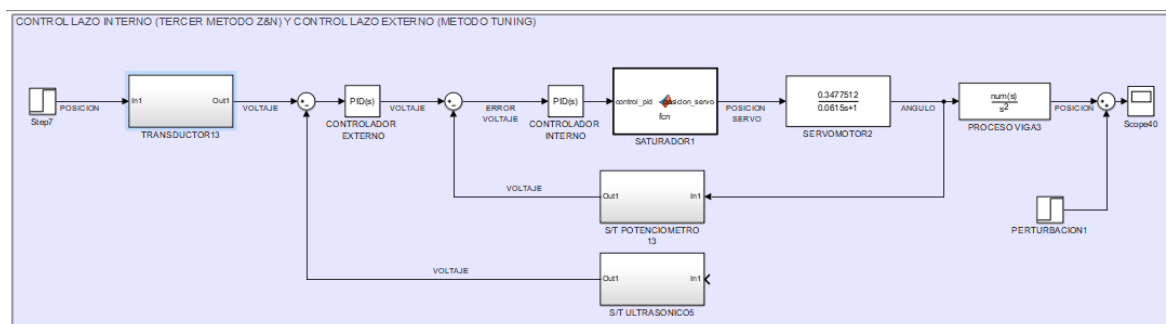


Figura 284 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 285 el controlador logra atenuar en un 100% la perturbación en un tiempo corto lo que hace al controlador sea eficaz

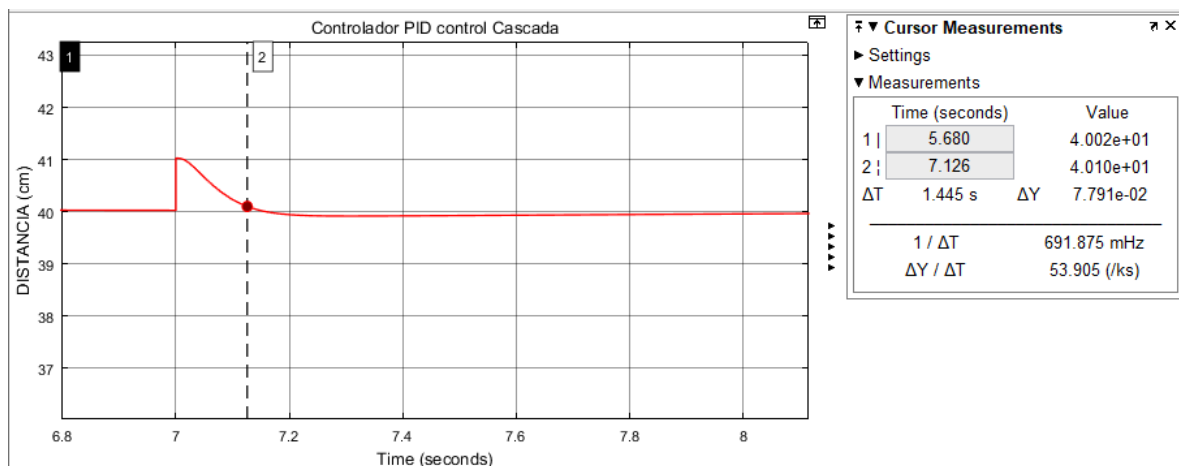


Figura 285 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.3. ANALISIS DE RESULTADOS CON SENSOR ULTRASONICO

Después de llevar a cabo la implementación de los diferentes controladores clásico y controladores cascada se lleva a cabo la comparación de los resultados obtenidos, teniendo el mejor controlado PID clásico y PID Control cascada

9.3.1. Controladores clásicos

Tabla 28 valores controladores clásicos. Autoría propia

CONTROLADORES CLASICOS								
CONTROL		REGIMEN TRANSITORIO					REGIMEN ESTABLE	
		Td (s)	Tr (s)	Tp (s)	Mp (cm)	Ts (s)	V. ACENTAMIENTO cm%	DE ERROR
2° Z&N	Normal	1,779	3,456	N/P	N/P	5,787	40	0
	Ruido	1,808	3,57	N/P	N/P	6,139	40	0
PD TUNING	Normal	0,974	2,026	N/P	N/P	3,85	40	0
	Ruido	1,052	2,291	N/P	N/P	5,921	38,4	0,05
PID TUNING	Normal	1,356	3,955	N/P	N/P	3,92	40	0
	Ruido	1,379	4,009	N/P	N/P	6,311	39,8	0,01

Como se puede observar en la tabla 28 en condiciones normales el controlador PD TUNING ofrecen los mejores criterios tanto en etapa transitoria como en etapa estable, el controlador PID por TUNING Y 2° método de Z&N ofrecen mejor respuesta al momento de someter el sistema a ruido a diferencia del control PD TUNING el cual no logra llegar al setpoint indicado

Para validar los resultados se graficará la salida de estos 3 modelos sometidos a un escalón de 40 en condiciones normales.

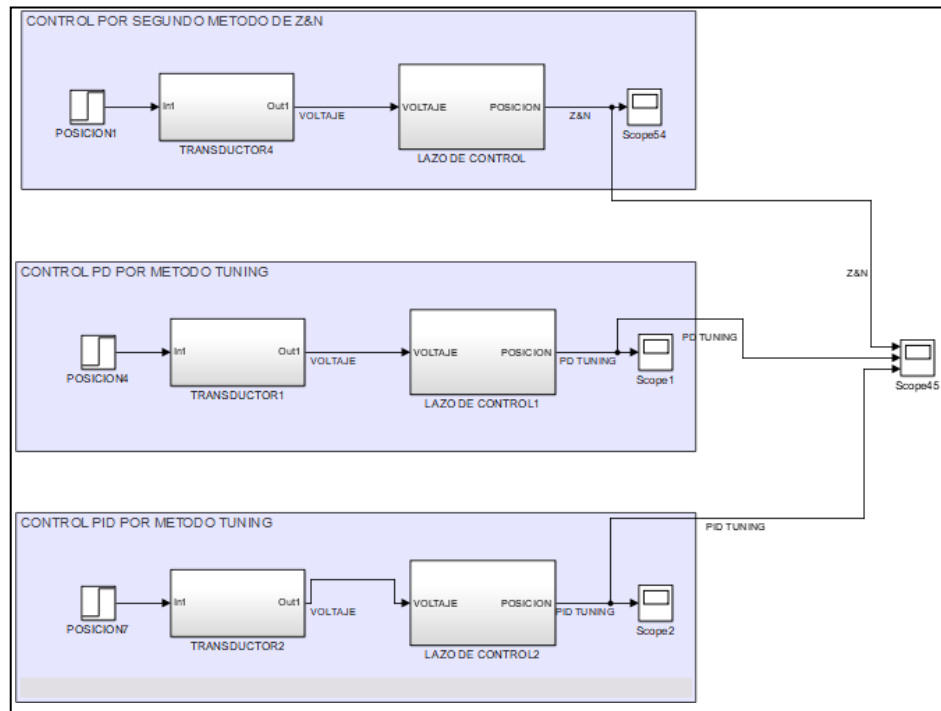


Figura 286 Diagrama de bloques controladores clásicos. Autoría propia

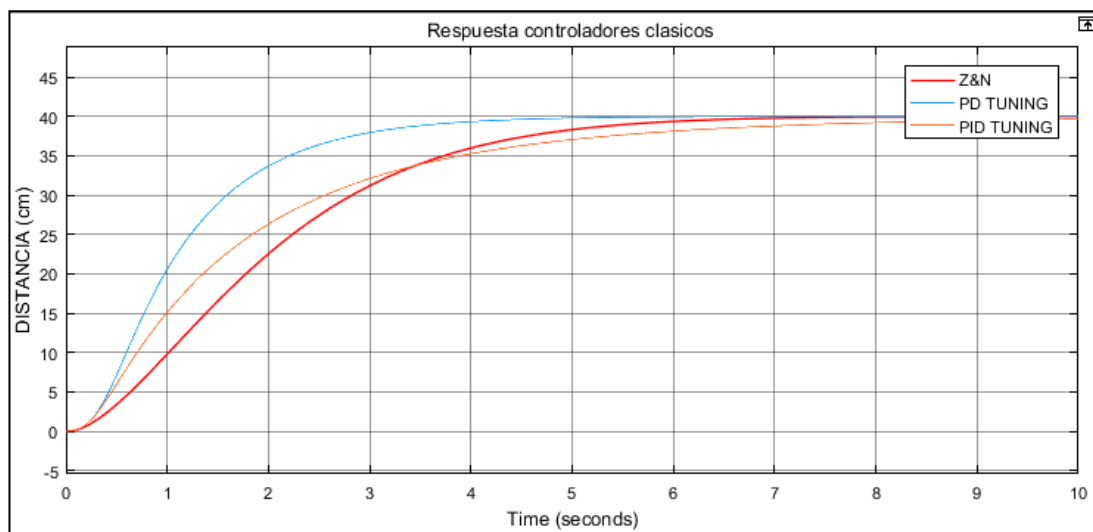


Figura 287 respuesta controladores clásicos. Autoría propia

Se someten los controladores a ruido para verificar cual ofrece mayor fiabilidad

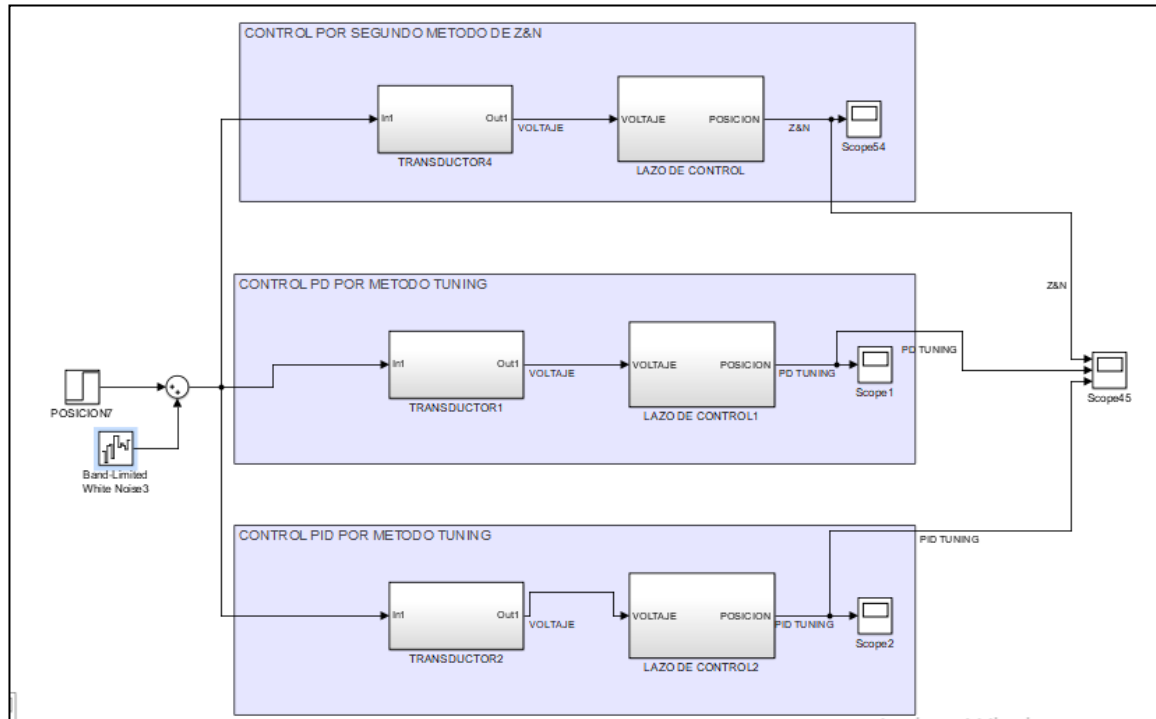


Figura 288 Diagrama de bloques controladores clásicos con ruido. Autoría propia

Se obtuvo la respuesta mostrada en la figura 289

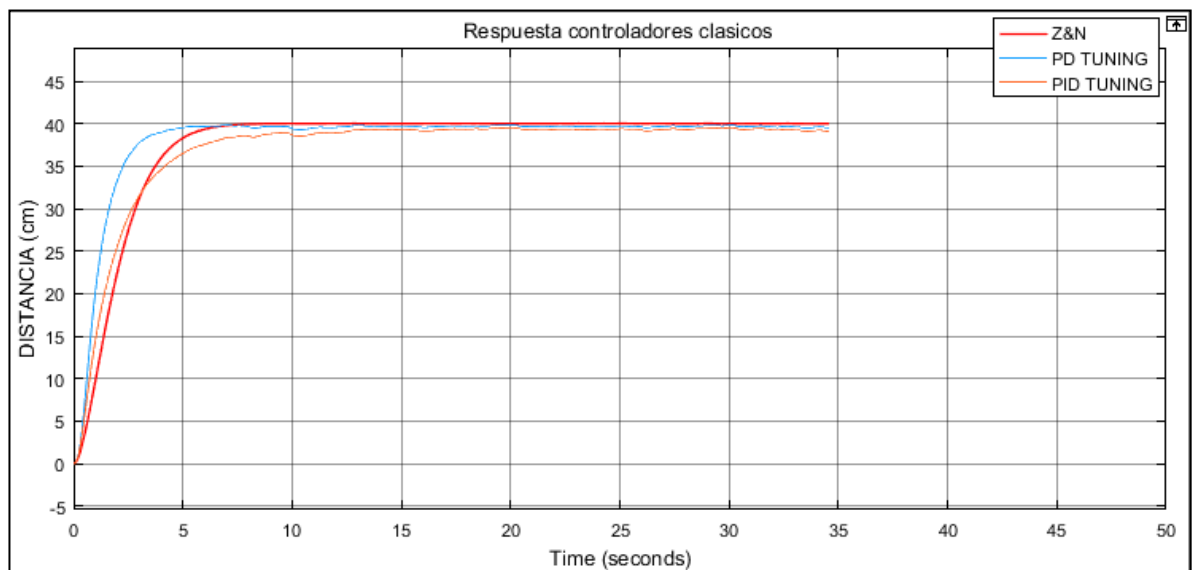


Figura 289 respuesta controladores clásicos con ruido. Autoría propia

Como se puede apreciar en la figura 289 el controlador por el 2° método de Z&N es el que ofrece estabilidad en el setpoint indicado logrando mitigar la acción de ruido presente en el sistema por tal motivo este será el controlador que se elige entre estos 3 modelos clásicos de control

9.3.2. Controladores clásicos control en cascada

Tabla 29 valores controladores clásicos en Cascada. Autoría propia

CONTROLADORES CLASICOS EN CASCADA								
CONTROL		REGIMEN TRANSITORIO					REGIMEN ESTABLE	
		Td (s)	Tr (s)	Tp (s)	Mp (cm)	Ts (s)	V. ACENTAMIENTO cm%	DE ERROR
L1 2° Z&N - L2 MANUAL	Normal	0,068	0,119	N/P	N/P	0,225	40	0
	Ruido	0,068	0,121	N/P	N/P	0,219	40,5	0,02
L1 2° Z&N - L2 TUNING	Normal	0,08	0,117	0,368	1,33	0,813	40	0
	Ruido	0,078	0,128	0,312	1,63	0,19	40,95	0,02
L1 DAHLIN - L2 MANUAL	Normal	0,082	0,12	0,301	1,53	0,192	40	0
	Ruido	0,082	0,126	0,304	1,76	0,219	40,81	0,02
L1 DAHLIN - L2 TUNING	Normal	0,063	0,096	0,279	3,96	1,25	40	0
	Ruido	0,063	0,095	0,3	4,23	0,141	40,71	0,02

Como se puede observar en la tabla 29 en condiciones normales el controlador en el lazo interno por el 2° método de Z&N y lazo externo método MANUAL en condiciones normales y frente a ruido no presenta sobre impulso, aunque presenta 0.57 cm en estado estacionario lo cual se encuentra dentro del rango del 0.02 % del valor del setpoint

Para validar los resultados se graficará la salida de estos 4 modelos sometidos a un escalón de 40 en condiciones normales obteniendo la respuesta que se muestra en la figura 290.

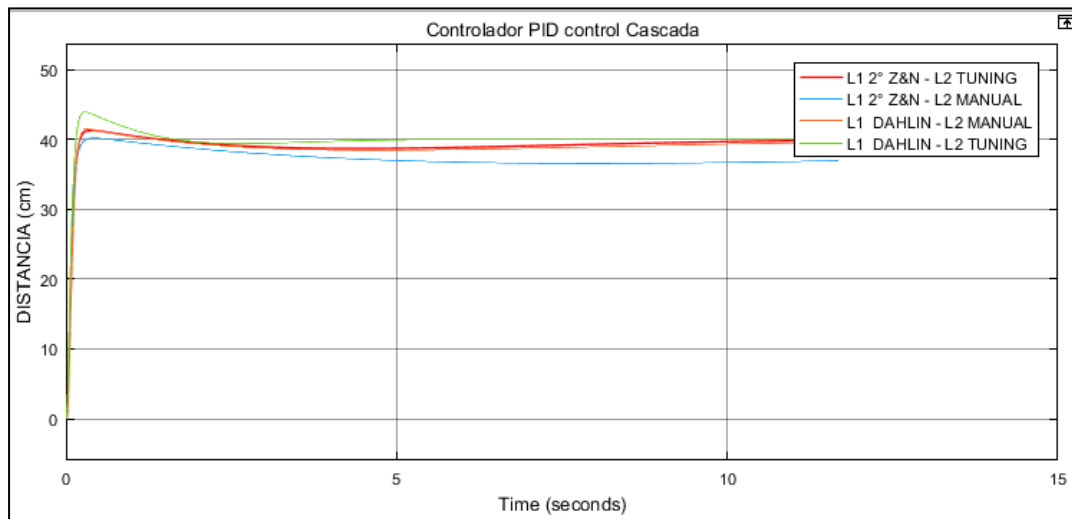


Figura 290 Respuesta controladores en cascada condiciones normales. Autoría propia

Los controladores que mejor comportamiento tienen, tanto en estado transitorio como en estado estable son lazo interno 2° método Z&N, lazo externo método TUNING y lazo interno método DAHLIN, lazo externo método MANUAL, los cuales presentan convergencia al setpoint, sobre impulso dentro del rango permitido (0.05% del valor de estabilización) y su tiempo de establecimiento es menor a 10 segundos, en base a la tabla 21 y la figura 229 se opta por el controlador L1 2° Z&N - L2 TUNING.

Se grafican los dos controladores (PID clásico – PID clásico cascada)

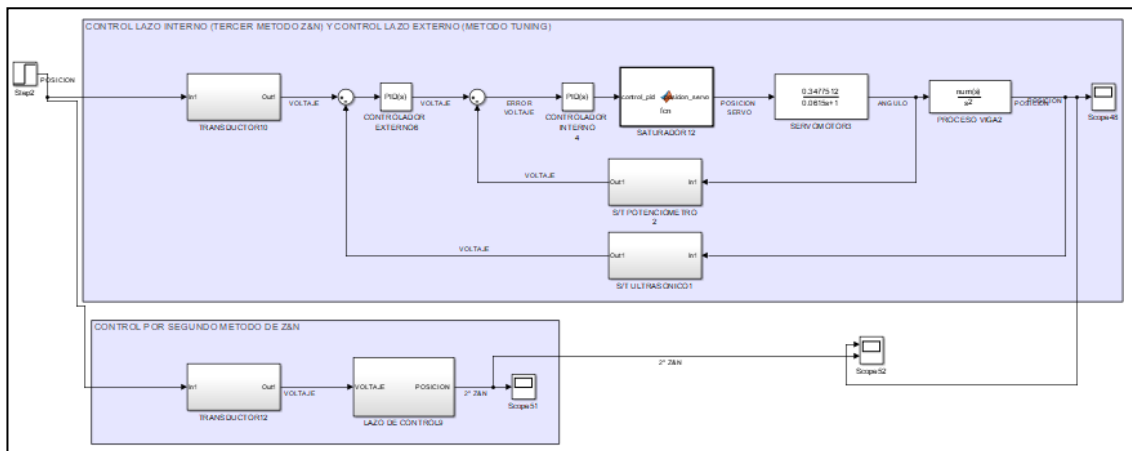


Figura 291 Diagrama de bloques Comparación controladores. Autoría propia

Respuesta controlador clásico y controlador cascada se observa en la figura 292

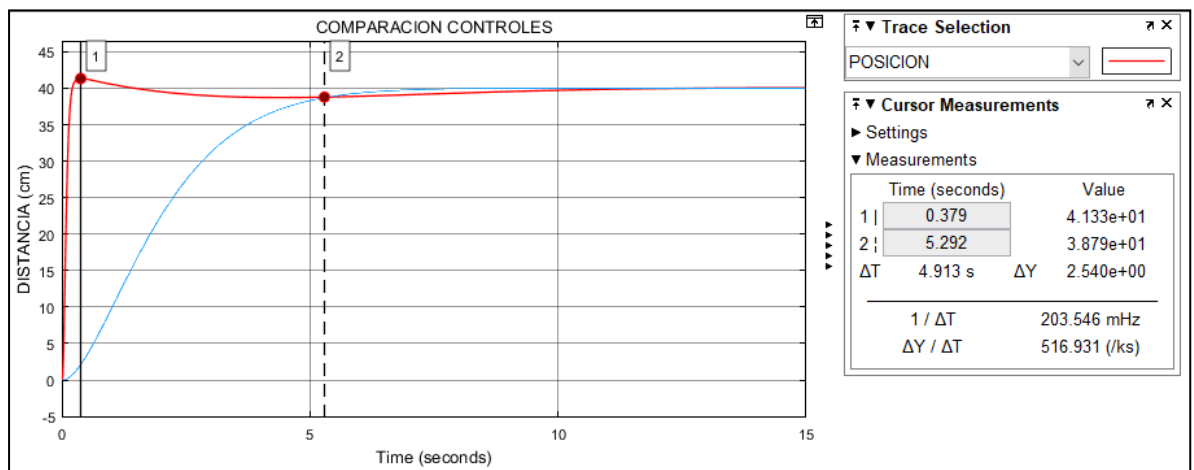


Figura 292 Comparación de controladores. Autoría propia

Los dos controladores logran tener convergencia antes de los 10 segundos, pero se puede observar que el controlador en cascada tiene una convergencia de 0.379 segundos, aun que presenta un pico de 1.33 cm lo que equivale al 0.035 % del valor final de estabilización este se encuentra dentro de los márgenes aceptables por tal motivo se comprueba que gracias al control cascada se logra una estabilización mar rápida al setpoint de entrada

9.4. DISEÑO DE CONTROLADORES CON VISIÓN ARTIFICIAL

Se somete la planta a una entrada escalón de 40 cm en lazo abierto para ver su comportamiento.

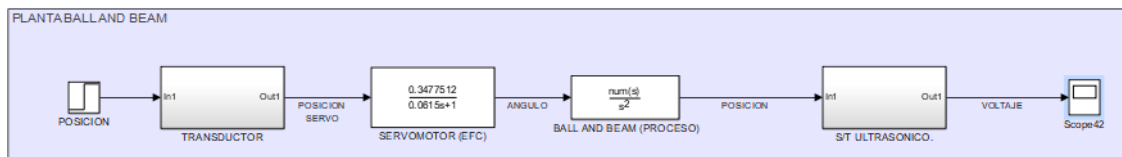


Figura 293 Diagrama de bloques lazo abierto. Autoría propia

La respuesta que se obtiene respecto al comportamiento de la posición se observa en la figura 294:

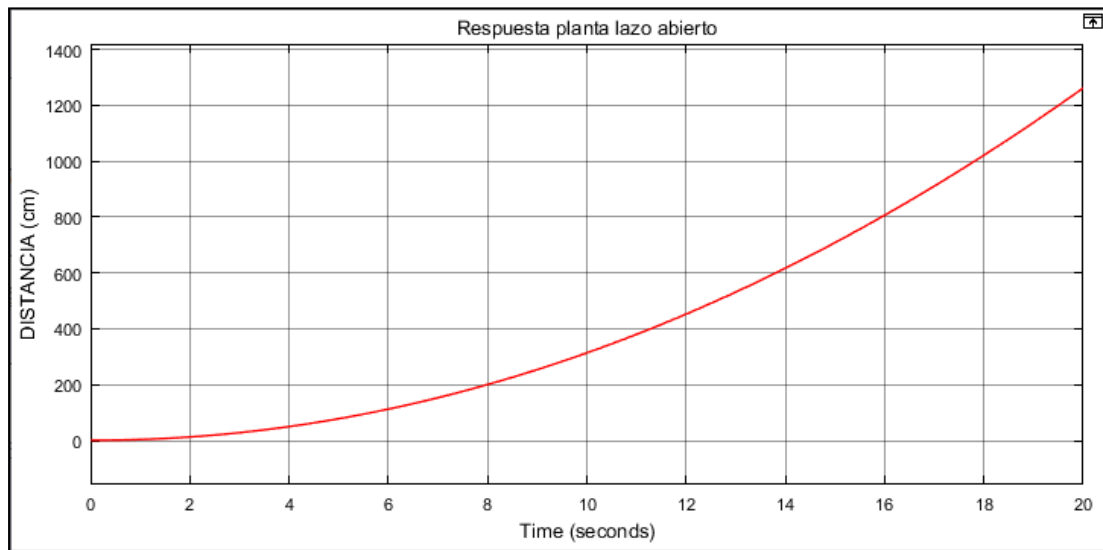


Figura 294 Respuesta planta a alza abierto

Como se puede observar en la figura anterior la salida del sistema da una respuesta exponencial, la cual no es convergente y tiende a infinito, por lo tanto, se debe aplicar métodos de control congruentes a este tipo de respuesta.

9.4.1. Controlador PID por segundo método de Z&N

En el segundo método de Z&N, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar. Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente.

El lazo de control que representa este tipo de control es el siguiente:

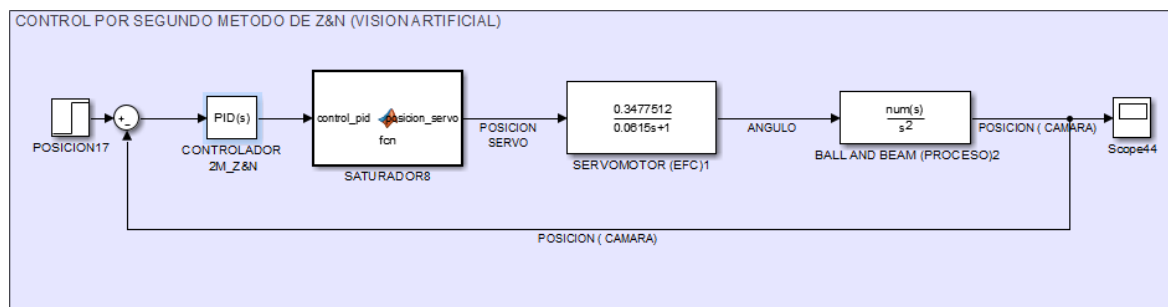


Figura 295 Diagrama de bloques Control 2 METODO Z&N. Autoría propia

El K_p se incrementó de 0 hasta un valor de K_{cr} como se muestra en la siguiente figura:

Source:	internal
Proportional (P):	0.03
Integral (I):	0
Derivative (D):	0
Filter coefficient (N):	100

Figura 296 Valor del parámetro K_{cr} . Autoría propia

Por lo tanto, la respuesta que se obtiene de este lazo de control se observa en la figura 297:

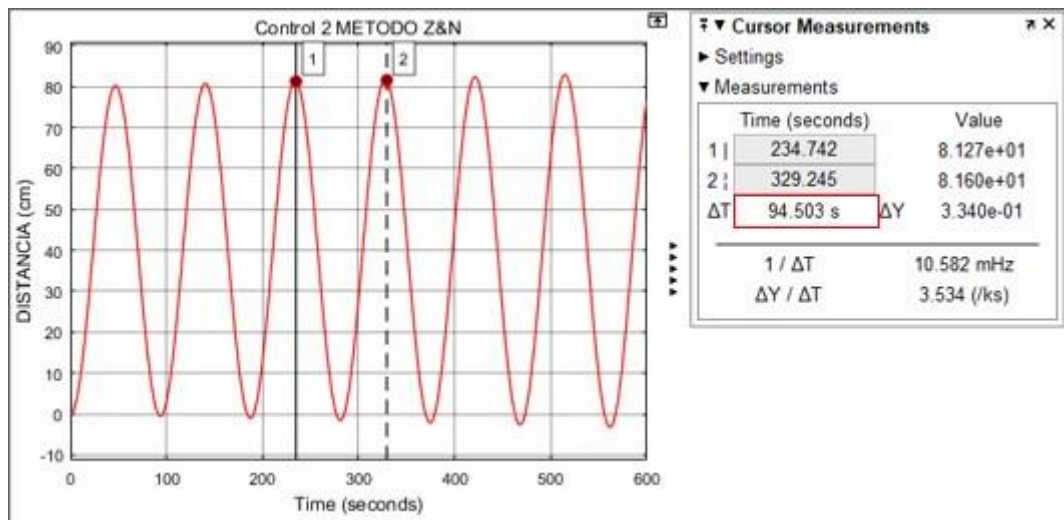


Figura 297 Valor del parámetro P_{cr} obtenido mediante la respuesta. Autoría propia

Se puede observar en la figura 297 el resultado de la constante P_{cr} que es 94.503. Por lo tanto, como ya fueron obtenidas K_{cr} y P_{cr} es posible aplicar el controlador PID por el segundo método de control de Z&N.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

$$Kp = 0.6 * 0.03 = 0.018$$

$$k_i = \frac{0.018}{47.25} = 0.00038$$

$$Kd = 0.018 * 5.90 = 0.1062$$

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0.018

Integral (I): 0.00038

Derivative (D): 0.1062

Filter coefficient (N): 100

Tune...

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Con una entrada escalón de 20 cm se obtiene la respuesta del sistema mostrada en la figura 299:

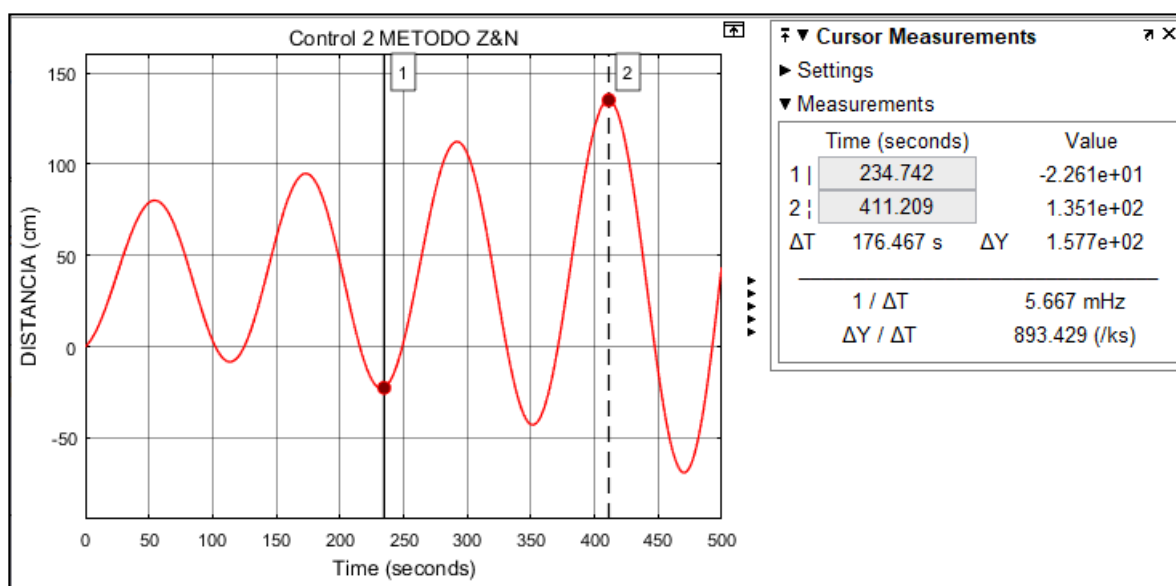


Figura 299 Respuesta obtenida del lazo de control con una entrada escalón de 20 cm.
Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 299 la respuesta no converge en la posición deseada, por lo tanto, se puede ver que este método de sintonización no siempre da una buena respuesta, pero se puede utilizar para ajustar el control del sistema de forma empírica, dicho esto se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 31 Ajuste de Parámetros PID. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	0.018	-	Mejoro	-	Mejoro	8	Mejoro	-	Mejoro
Ki	0.00011625	-		-		-		-	
Kd	0.69677325	2		10		-		20	

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 5	Resultado	Prueba 6	Resultado	Prueba 7	Resultado	Prueba 8	Resultado
Kp	0.018	20	Mejoro	-	Mejoro	50	Mejoro	-	Mejoro
Ki	0.00011625	-		-		-		-	
Kd	0.69677325	-		40		-		110	

La respuesta que se obtiene con estos cambios es la de la figura 300:

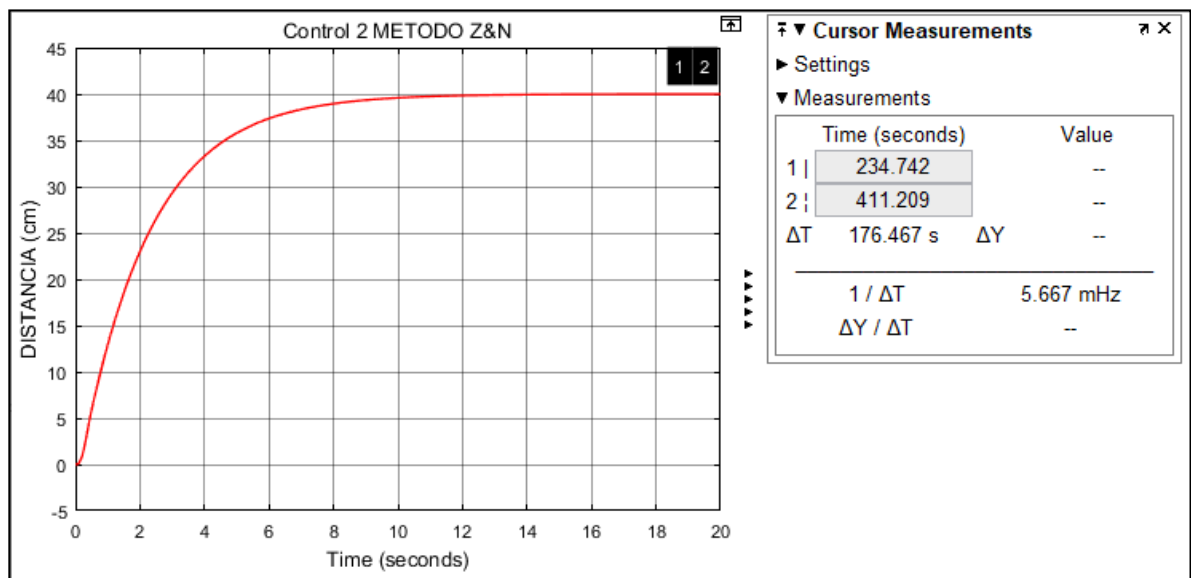


Figura 300 Señal obtenida con ajuste de parámetros PID. Autoría propia

Como se puede ver en la gráfica de la figura 300 la respuesta mejora notoriamente, ya que tiene una excelente mejora y convergencia ante las oscilaciones presentadas en la gráfica sin ajustar, y además el tiempo de establecimiento también presenta un cambio satisfactorio.

9.4.2. Controlador PD por método Tuning

El ajuste basado en modelos o el ajuste PD basado en optimización le permite obtener sus parámetros P y D de manera óptima. Sus objetivos de control (rechazo de perturbaciones y seguimiento del punto de ajuste) junto con un modelo de su sistema y las especificaciones de ingeniería del comportamiento de lazo cerrado determinan el conjunto final de parámetros de ajuste.

El ajuste basado en modelos es el método de ajuste PID que le permite trabajar de acuerdo con un proceso de ajuste estructurado que considera tanto el comportamiento del proceso como sus necesidades de control.

El lazo de control que representa este tipo de control es el siguiente:

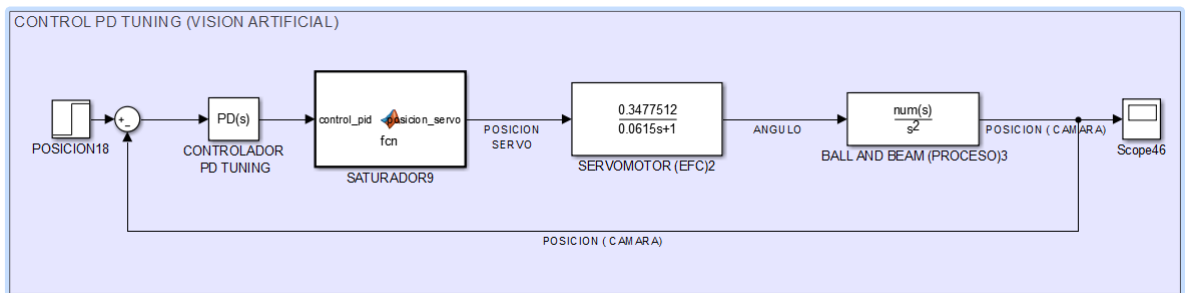


Figura 301 Diagrama de bloques de control por método Tuning. Autoría propia

Ahora se procede a aplicar el método de Tuning para un controlador PD.

Figura 302 Aplicación de método Tuning. Autoría propia

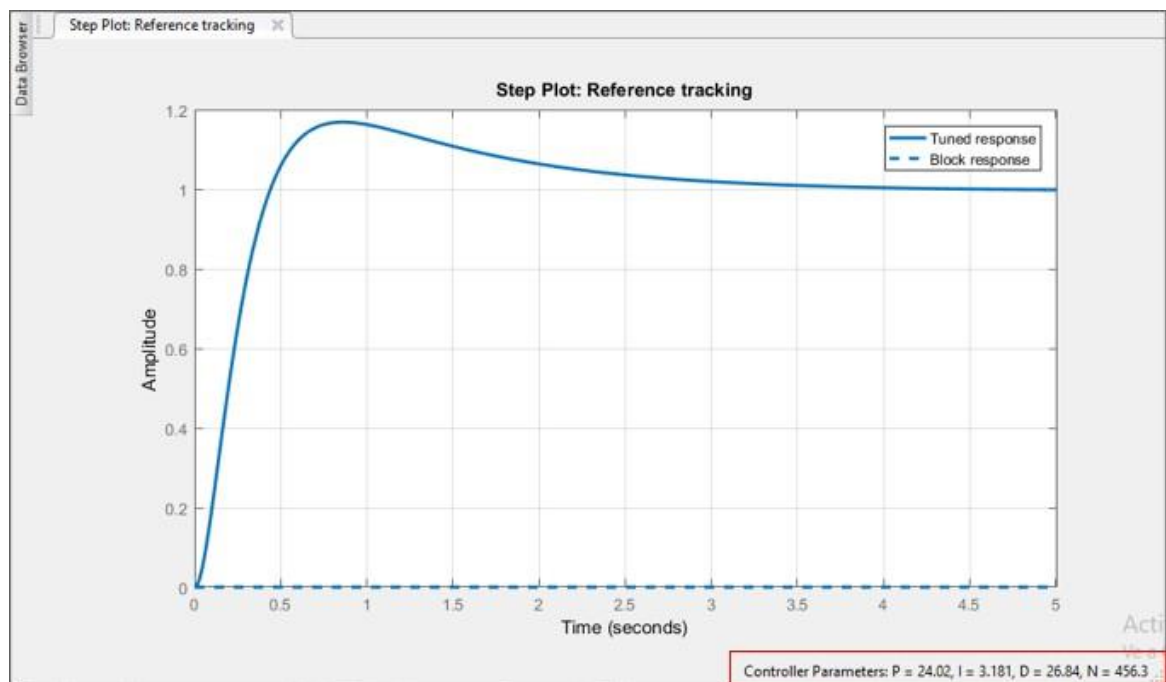


Figura 303 Respuesta aplicando el método Tuning. Autoría propia

El controlador PD queda con los siguientes parámetros

Controller parameters

Source:

internal

Proportional (P):

14.6131652242607

Derivative (D):

24.3677520192592

Filter coefficient (N):

92.2795750683299

Tune...

Initial conditions

Compensator formula

$$P + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Figura 304 Parámetros del controlador por método Tuning. Autoría propia

La respuesta que se obtiene para un valor deseado de 20 cm con este controlador es la de la figura 305:

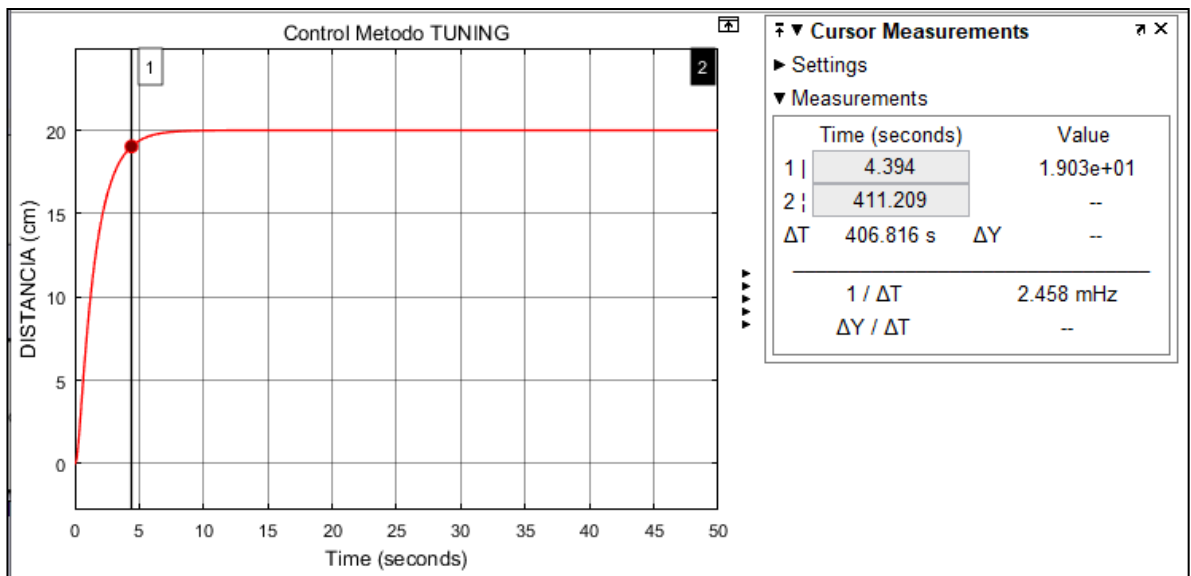


Figura 305 Señal de salida del sistema con el controlador PD por método Tuning. Autoría propia

Observando la gráfica de la figura 305 se puede apreciar que la respuesta obtenida es la deseada, su oscilación es menor del 10% de la consigna y el tiempo de establecimiento es rápido, lo cual hace que este tipo de controlador sea adecuado para el sistema.

9.4.3. Controlador PID por método Tuning

El ajuste basado en modelos o el ajuste PID basado en optimización le permite obtener sus parámetros P, I y D de manera óptima. Sus objetivos de control (rechazo

de perturbaciones y seguimiento del punto de ajuste) junto con un modelo de su sistema y las especificaciones de ingeniería del comportamiento de lazo cerrado determinan el conjunto final de parámetros de ajuste.

El ajuste basado en modelos es el método de ajuste PID que le permite trabajar de acuerdo con un proceso de ajuste estructurado que considera tanto el comportamiento del proceso como sus necesidades de control.

El lazo de control que representa este tipo de control es el siguiente:

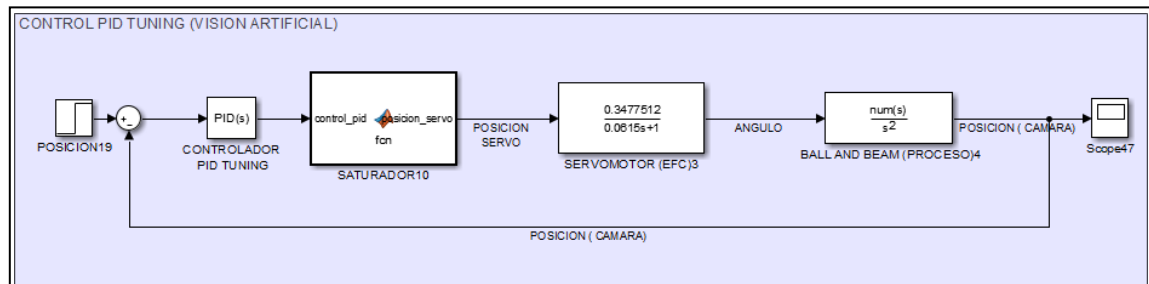


Figura 306 Diagrama de bloques de control PID por método Tuning. Autoría propia

Ahora se procede a aplicar el método de Tuning para un controlador PID.

Controller parameters

Source:	internal	☐ Compensator formula
Proportional (P):	0	
Integral (I):	0	
Derivative (D):	0	
Filter coefficient (N):	100	
Select Tuning Method:	Transfer Function Based (PID Tuner App)	Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Figura 307 Aplicación de Tune para controlador PID. Autoría propia

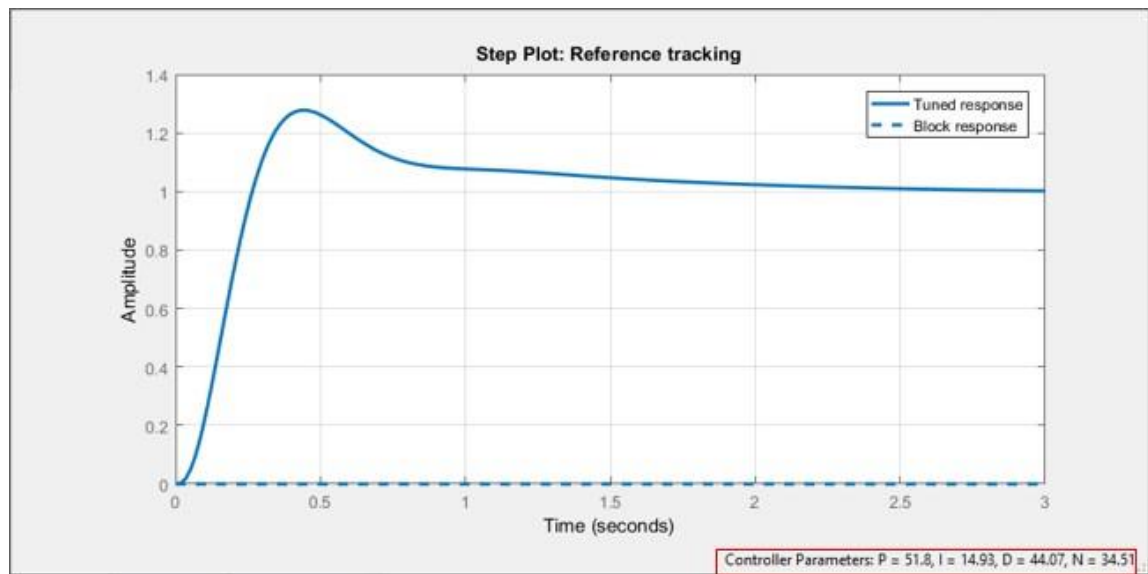


Figura 308 Repuesta obtenida al tunear el controlador. Autoría propia

El controlador PID queda con los siguientes parámetros

Controller parameters

Source:

internal

☐
[Compensator formula](#)

Proportional (P):

51.7996836765977

Integral (I):

14.9269351973385

Derivative (D):

44.0656874663893

Filter coefficient (N):

34.5115777530177

Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Figura 309 Parámetros del controlador PID por método Tuning. Autoría propia

La respuesta que se obtiene para un valor deseado de 20 cm con este controlador se observa en la figura 310:

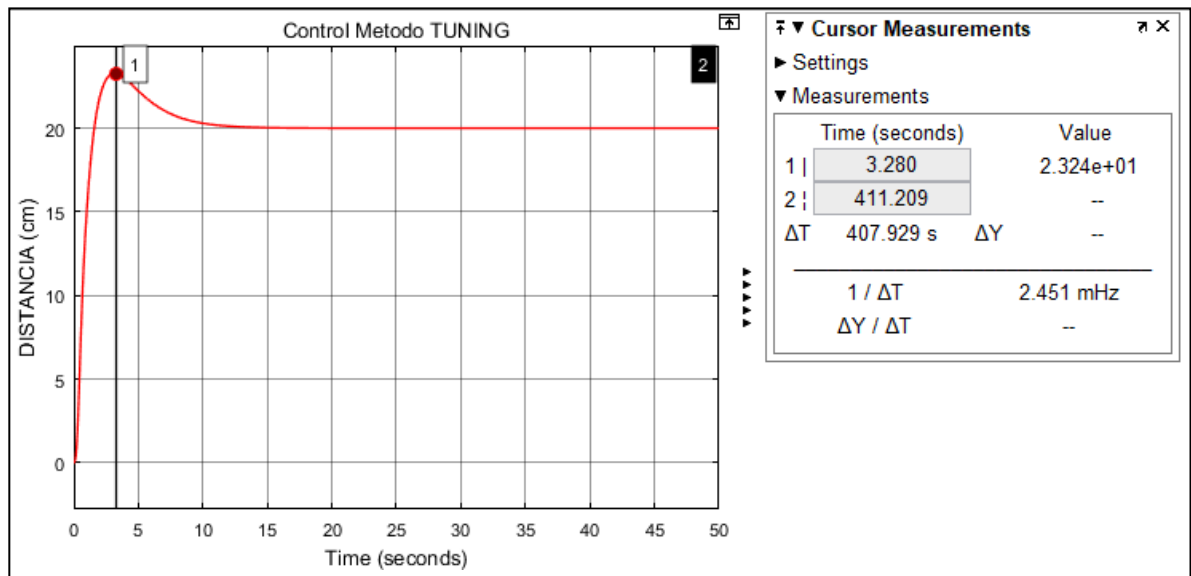


Figura 310 Señal de salida de lazo de control con controlador PID por método Tuning. Autoría propia

Observando la gráfica de la figura 310 se puede apreciar que la respuesta obtenida es la deseada, pero en comparación con la del controlador PD por Tuning presenta una oscilación mayor al 10% de la consigna, esto se debe a que la constante integral tiene una gran influencia en el controlador y al ser un factor que es acumulativo tarda tiempo en hacerse pequeña generando que el sistema presente este sobrepaso. Para solucionar este inconveniente se aplicó ANTI-WINDUP para mitigar los efectos negativos de la acción integral.

$$t_w = \frac{1}{\sqrt{t_i * t_d}} = 0.50903 \quad (50)$$

En la figura 311 se puede observar el diagrama de bloques del lazo de control con ANTI-WINDUP

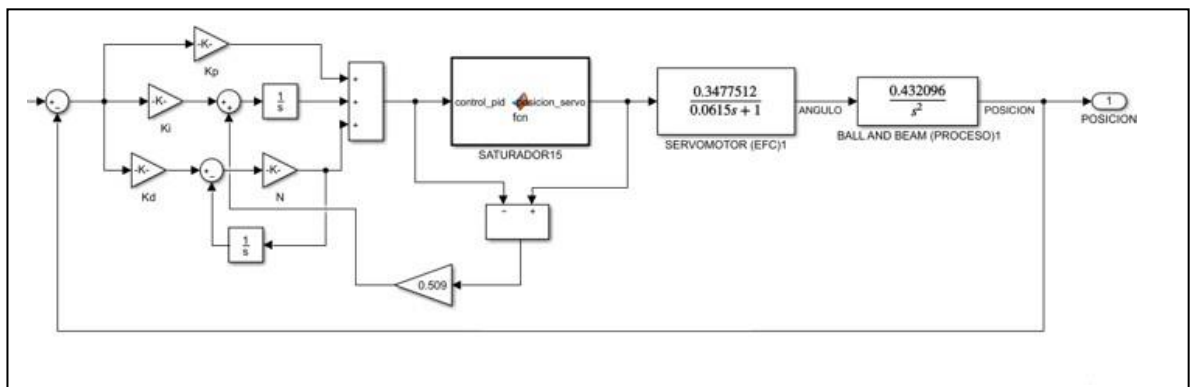


Figura 311 Controlador PID con Anti-Windup. Autoría propia

La respuesta del sistema obtenida (figura 312) en comparación a la respuesta sin Anti-Windup (figura 310) se puede observar que el sobrepaso disminuyo notablemente y el tiempo de establecimiento es un poco más rápido.

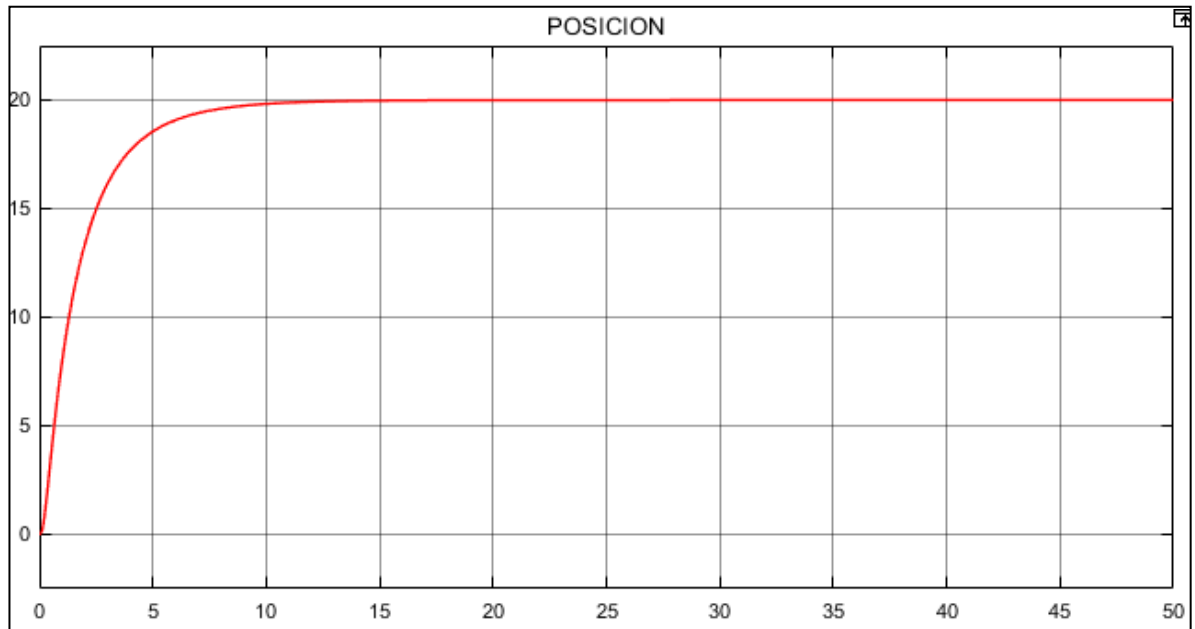


Figura 312 Respuesta del sistema al aplicar Anti-Windup. Autoría propia

9.4.4. Validación de la metodología para controladores obtenidos

Para el proceso de validación se tuvieron en cuenta los márgenes de respuesta del sistema ante los diferentes tipos de control (PID segundo método Z&N, PD por Tuning y PID por Tuning) para el régimen transitorio, así como también un estudio para el régimen estable.

Los márgenes de respuesta en el régimen transitorio tenidos en cuenta fueron tiempo de retardo (t_d), tiempo de levantamiento (t_r), máximo pico (m_p), tiempo pico (t_p) y tiempo de establecimiento (t_s) ya que es un sistema con entrada de tipo escalón unitario. Estos 5 márgenes se definen como:

- Tiempo de retardo: tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez al 50% del valor final.
- Tiempo de levantamiento: tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%.
- Máximo pico: Es el valor pico máximo de la curva de respuesta
- Tiempo pico: Es el tiempo que tarda el sistema en llegar al máximo pico
- Tiempo de establecimiento: tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado

por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

El estudio se realizó con el fin de conocer la respuesta del sistema ante los diferentes controladores, así como también detallar más a fondo la respuesta en estado estable, mediante un indicador como lo es el error promedio. En general se hicieron 9 experimentos por software, los cuales se señalan a continuación:

- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID por segundo método Z&N ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PD por Tuning ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID por Tuning ante una perturbación.

9.4.4.1. Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control

9.4.4.1.1. Puesta del sistema control pid segundo metodo de z&n en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 40 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

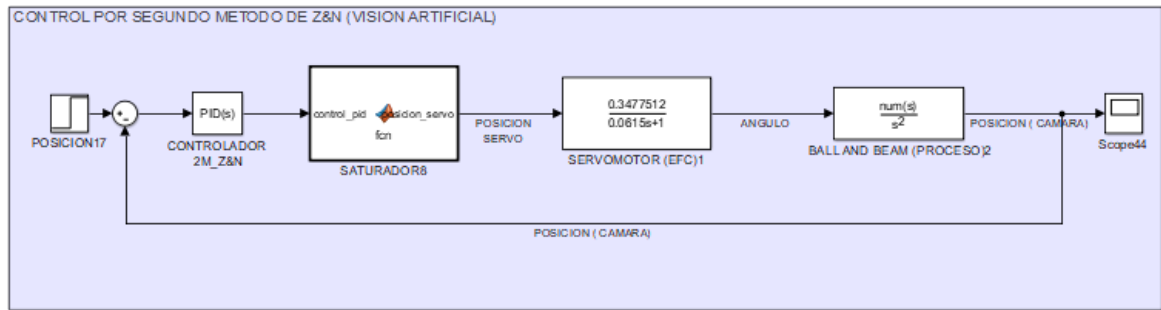


Figura 313 Control por Segundo Método Z&N. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema.

9.4.4.1.2. Puesta del sistema de control PD por Tuning en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 40 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

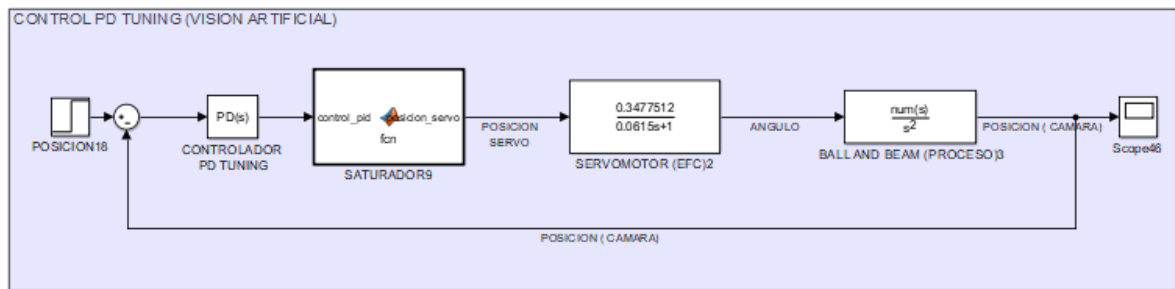


Figura 314 Control PD TUNING. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 14 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 16 es retirada del sistema.

9.4.4.1.3. Puesta del sistema de control PID Tuning en simulación de la planta

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador para la toma de la muestra de la señal de salida se utiliza el bloque To Workspace de Simulink.

El proceso de la toma de la data se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 43.5 cm (posición del carro) y se captura un total de 4153 datos por la data obtenida de la simulación.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del lazo de control simulado con controlador PID por el segundo método de Z&N.

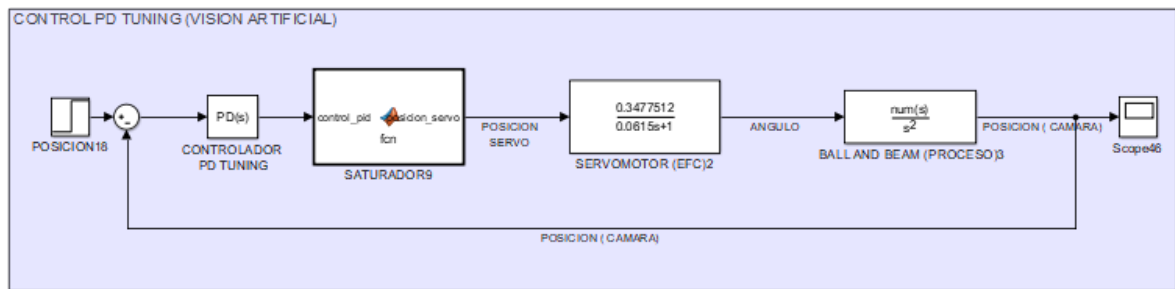


Figura 315 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia

- Ruido

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que se agrega una señal aleatoria de ruido mediante el bloque Band-Limited White Noise con un valor máximo del 0.05% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 14 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 16 es retirada del sistema

9.4.4.2. Validación estadística de los resultados

9.4.4.2.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por segundo método Z&N

- Condiciones normales

En la figura 316 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

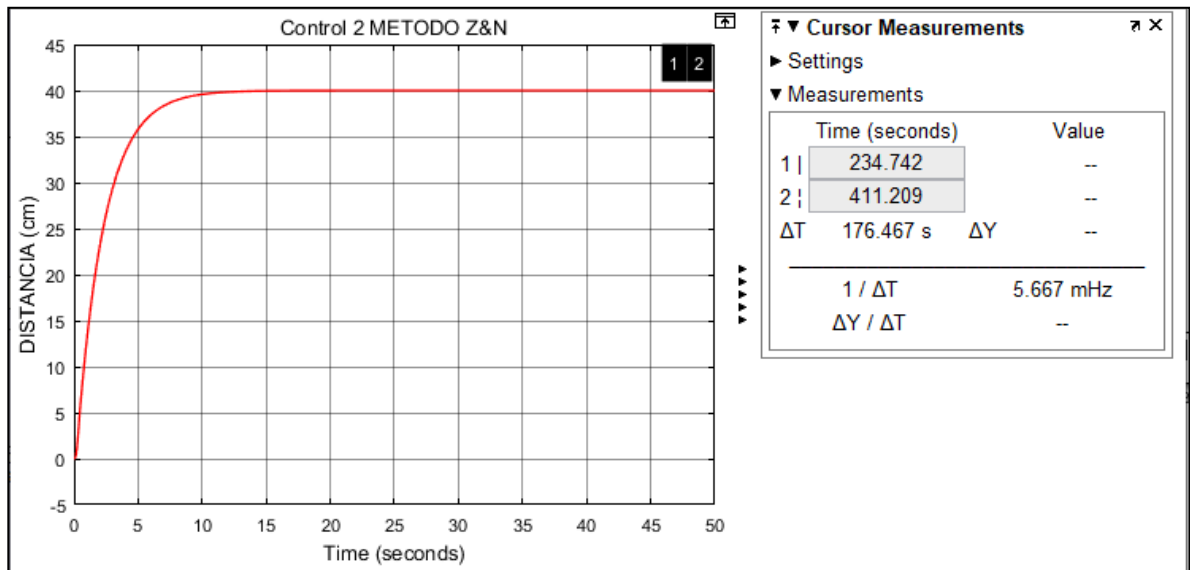


Figura 316 Respuesta del sistema con controlador PID por segundo método de Z&N. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

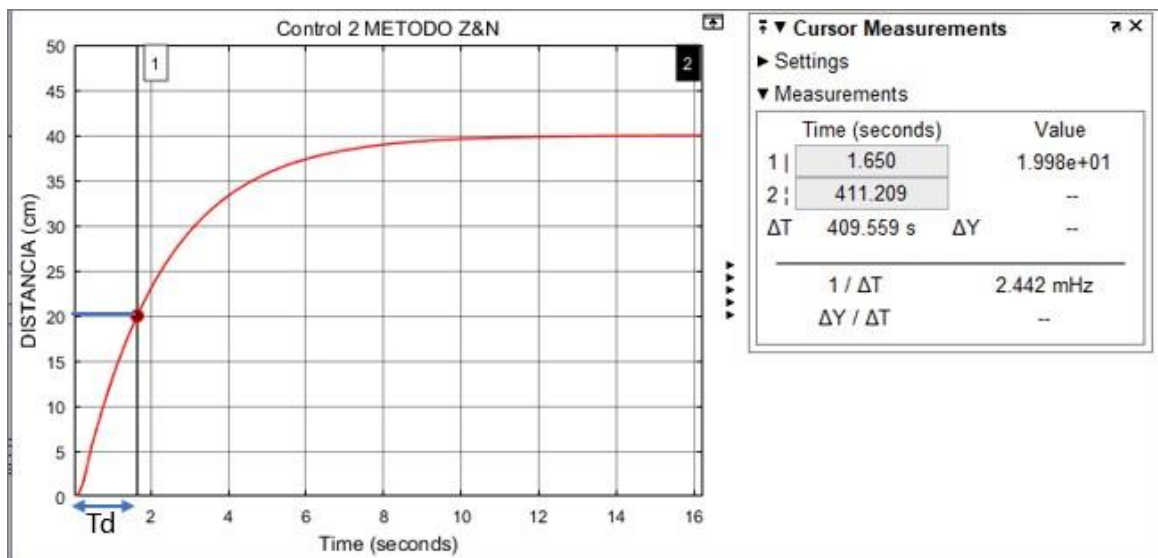


Figura 317 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.650 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

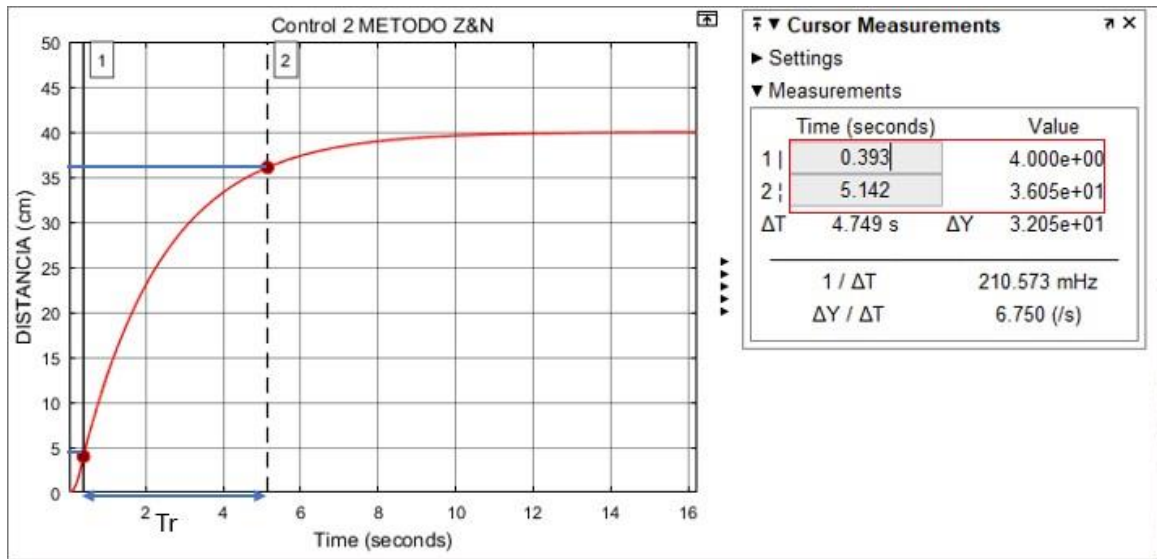


Figura 318 4

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 5.142 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.393 segundos

$Tr = 5.141 - 0.393 = 4.748$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.8

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

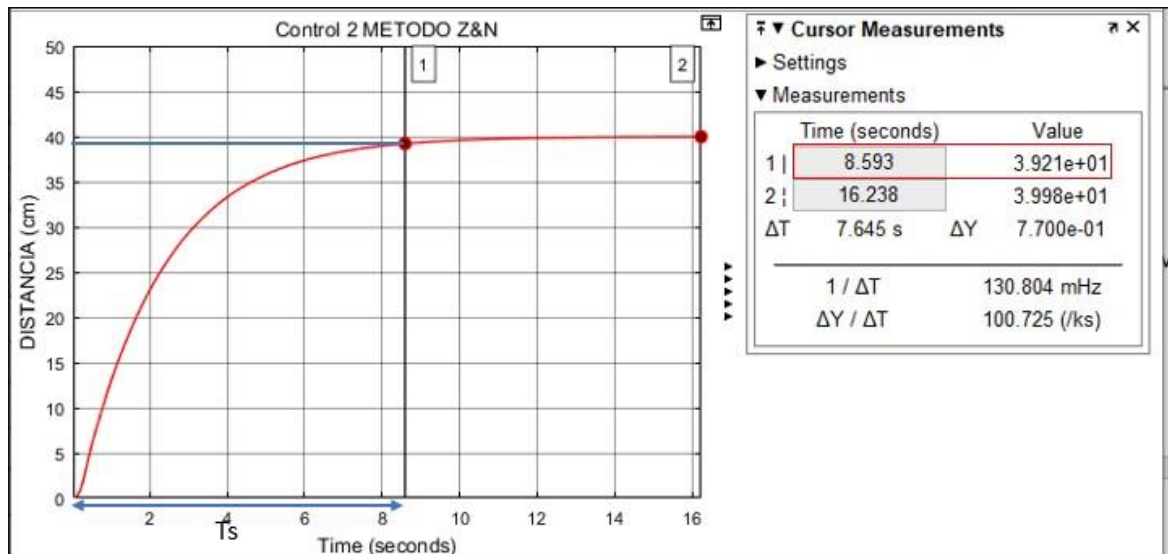


Figura 319 Tiempo de establecimiento 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.787 segundos

- Ruido

En la figura 320 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

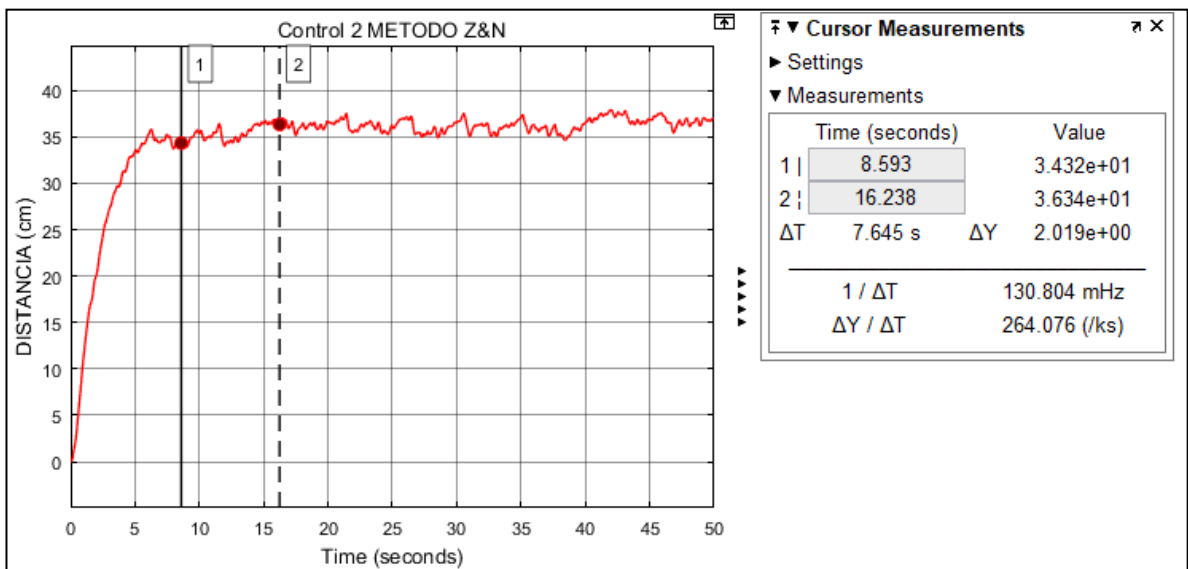


Figura 320 Respuesta del sistema controlador PID 2 METODO Z&N con ruido

Valor final (VF)= 37.6 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 18.8 cm

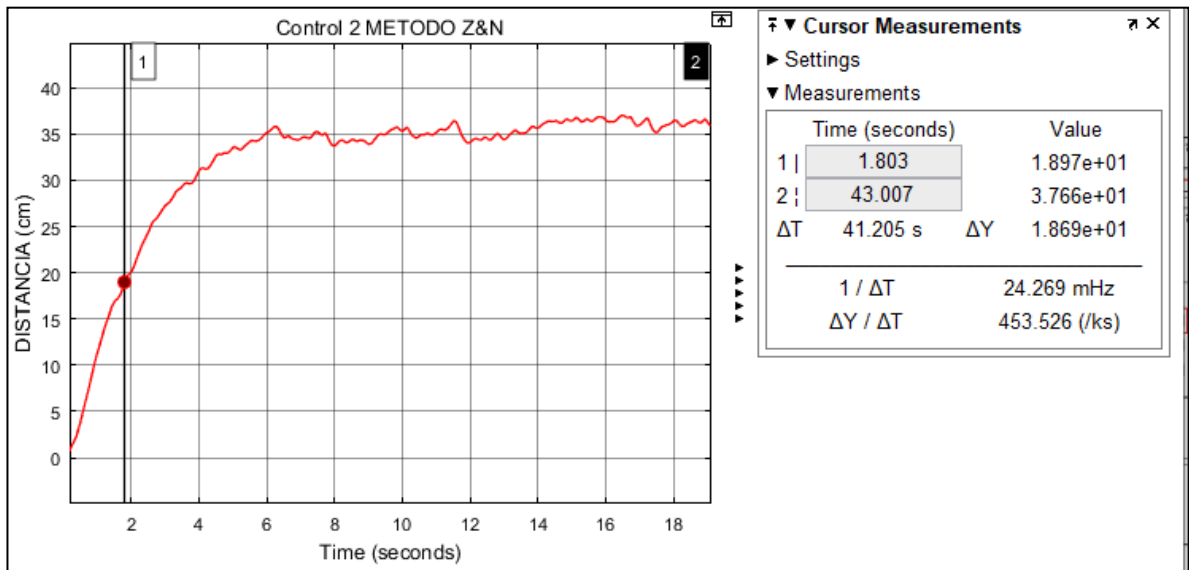


Figura 321 50% del punto de estabilización PID por segundo método de Z&N con ruido.
Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =1.803 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 33.84 cm

10% de VF= 3.76 cm

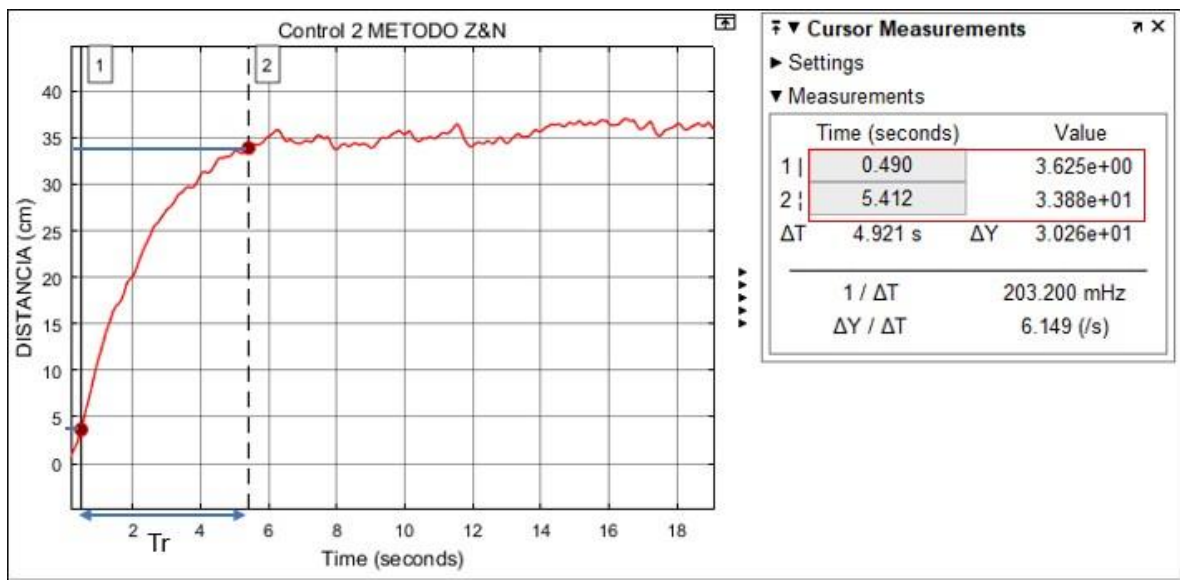


Figura 322 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 5.412 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.490 segundos

$T_r = 5.412 - 0.490 = 4.922$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.752$$

De esta manera el rango es 38.3 para el límite superior y 36.9 para el límite Inferior.

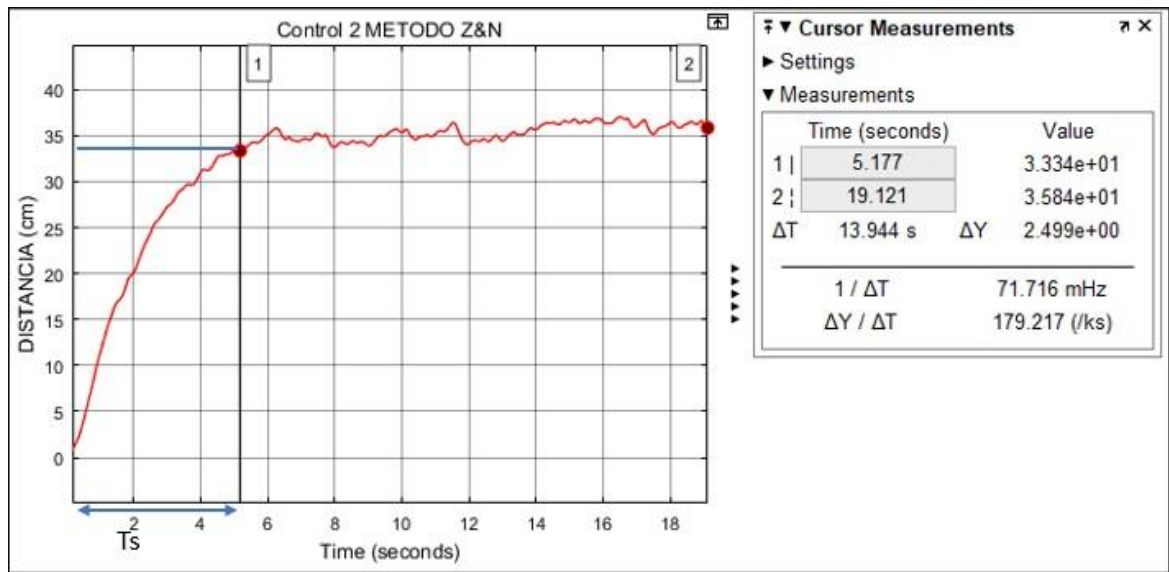


Figura 323 Tiempo de establecimiento 98% con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.177 segundos

9.4.4.2.2. Estudio del régimen estable del sistema de control PID por segundo método Z&N

- Ruido

En la figura 324 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 325 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

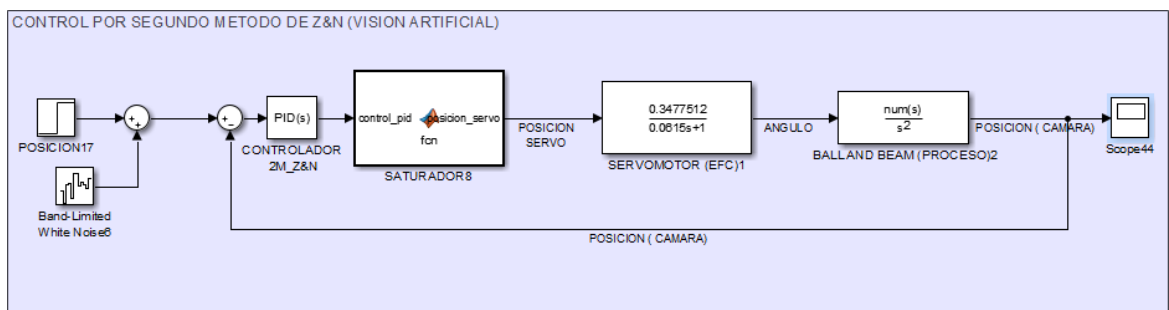


Figura 324 Diagrama de bloques de control por 2º método Z&N ante ruido. Autoría propia

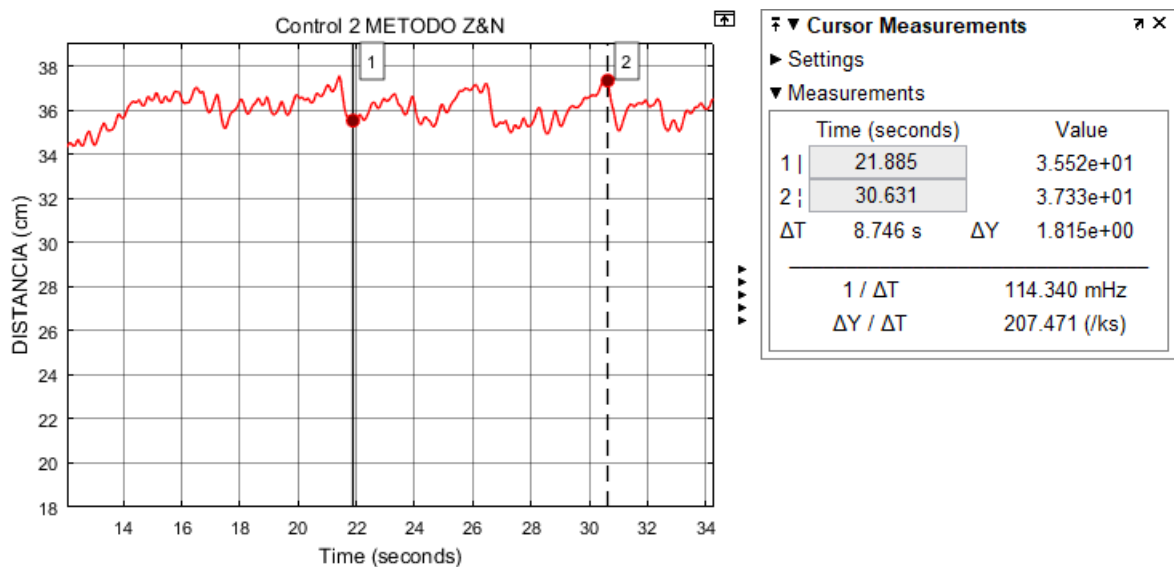


Figura 325 respuesta del sistema con control por 2º método Z&N ante ruido. Autoría propia

Como se observa en la figura 325 el controlador no logra llegar al setpoint indicado ni se atenúa en un 100% el ruido

- Perturbación

En la figura 326 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 327 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

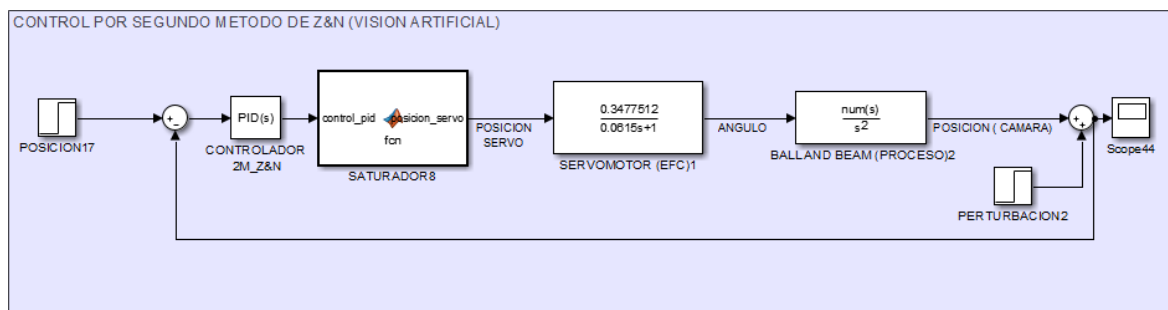


Figura 326 Diagrama de bloques del sistema ante perturbación con controlador por 2º método de Z&N. Autoría propia

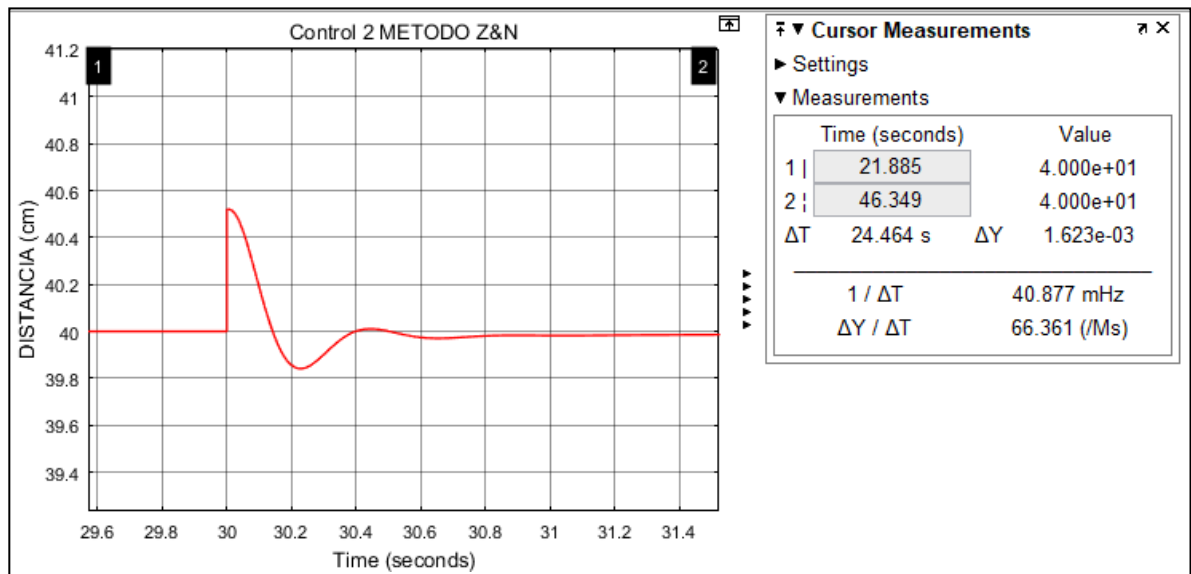


Figura 327 respuesta del sistema ante perturbación con controlador por 2° método de Z&N. Autoría propia

Como se observa en la figura 327 en el instante de tiempo 30 se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 0.87 cm llevando el nivel del tanque a un valor de 40 cm y permaneciendo en el sistema durante 0.7 segundos, en este trascurso de tiempo el controlador logra reducir la perturbación un 100% llevando el sistema a un valor de 40 cm por lo que en definitiva logro compensar el valor de la perturbación.

9.4.4.2.3. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PD por Tuning

- Condiciones normales

En la figura 328 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

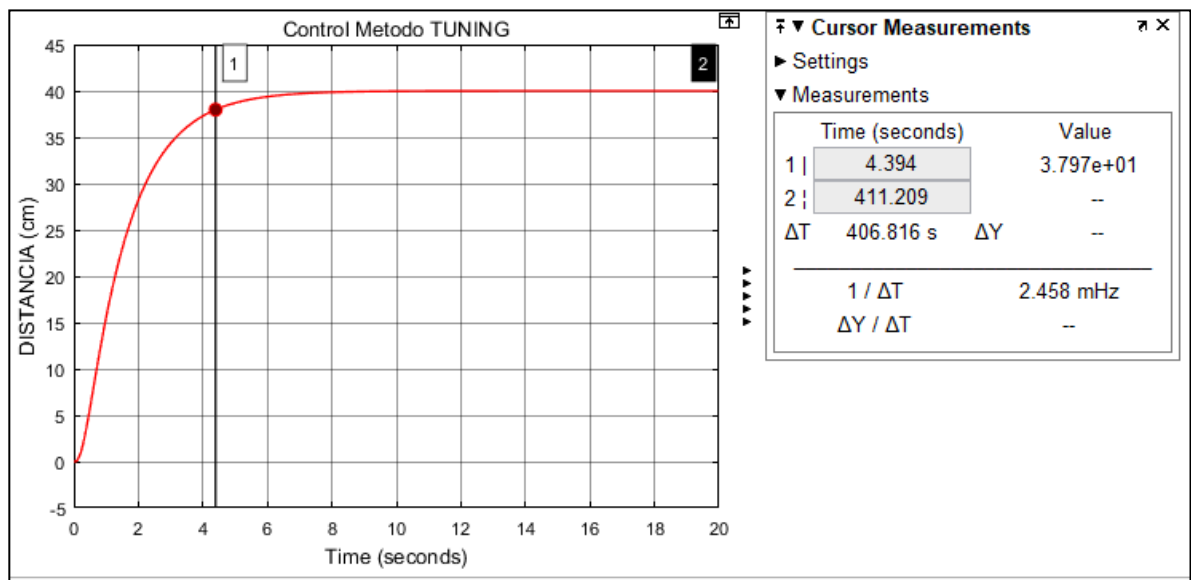


Figura 328 Controlador PD METODO TUNING. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

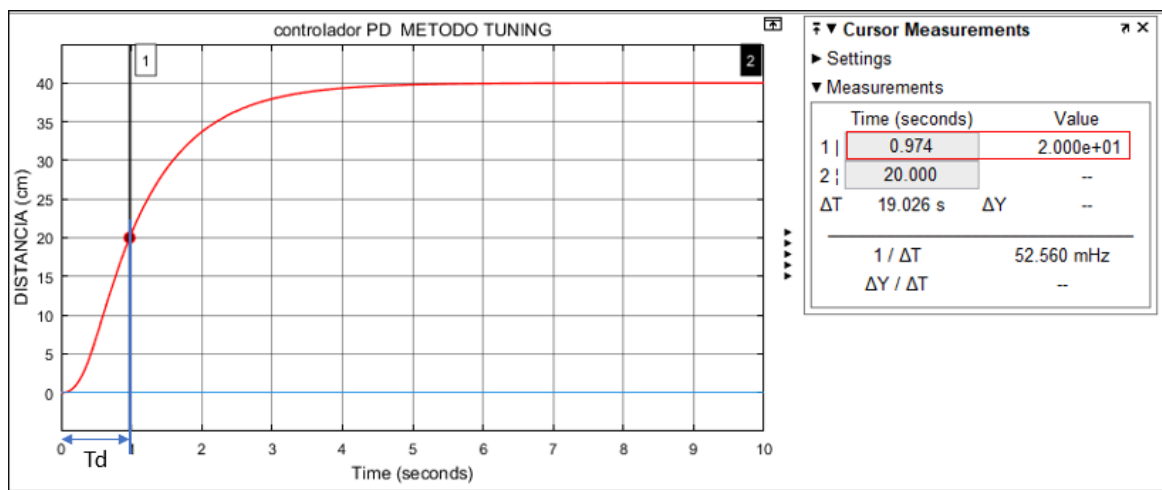


Figura 329 50% del punto de estabilización PD por METODO TUNING. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =0.974 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

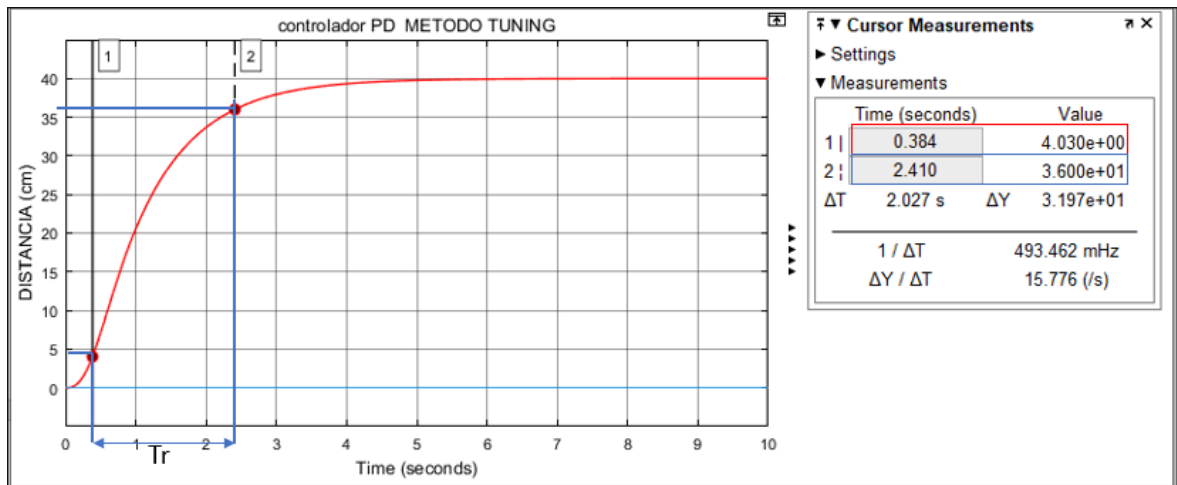


Figura 330 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.410 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.384 segundos

$Tr = 2.410 - 0.384 = 2.026$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

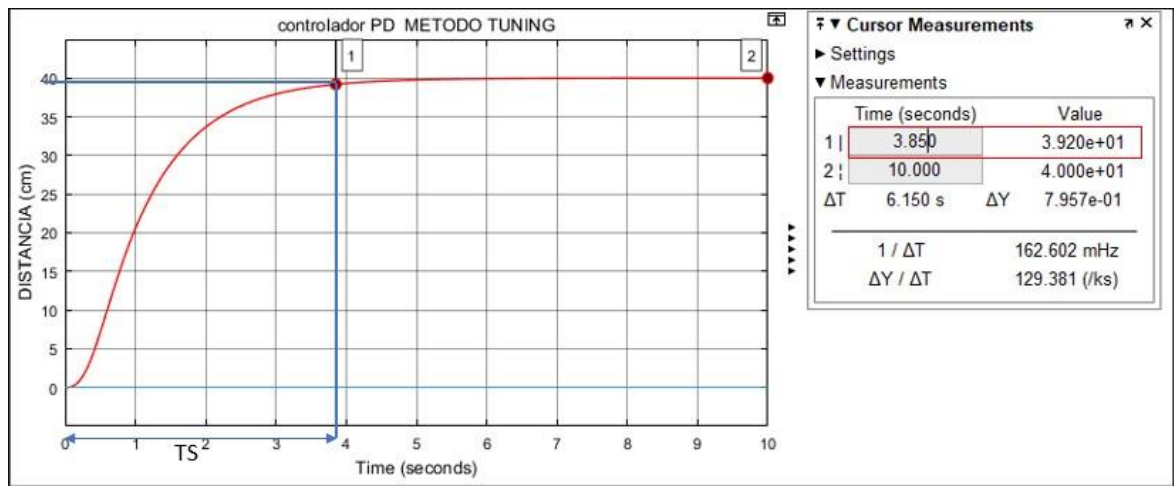


Figura 331 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 3.850 segundos

- Ruido

En la figura 332 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

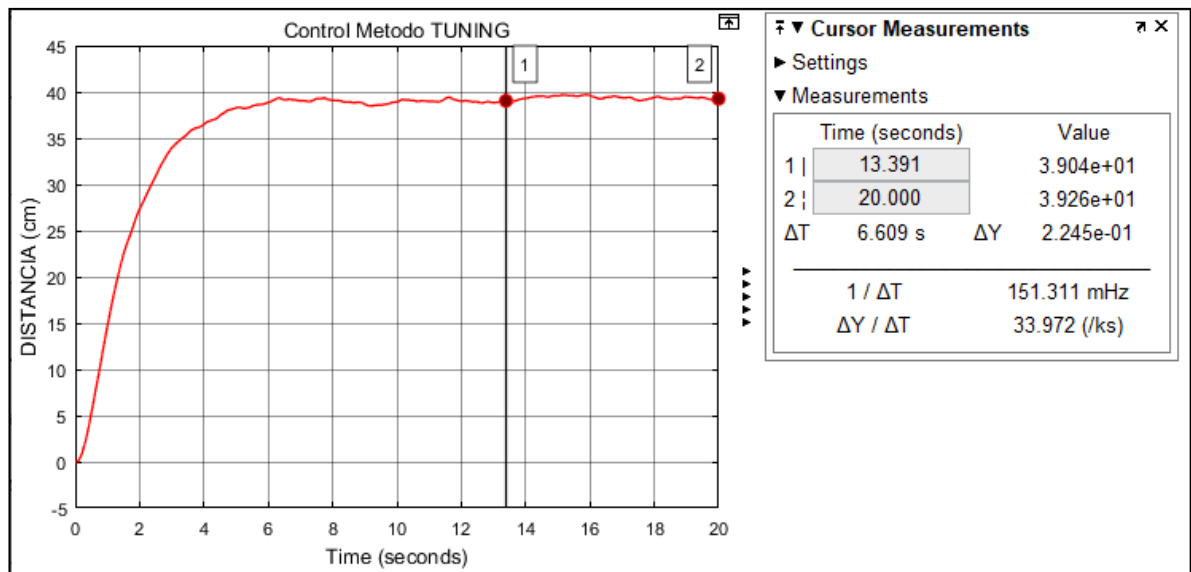
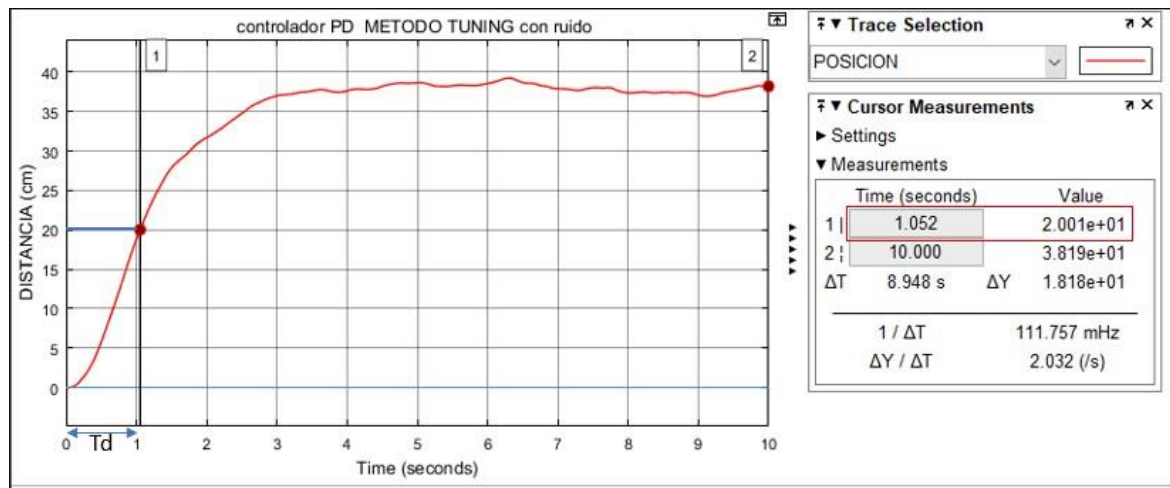


Figura 332 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 39.26 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 19.63 cm



Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 1.052 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 35.33 cm

10% de VF= 3.96 cm

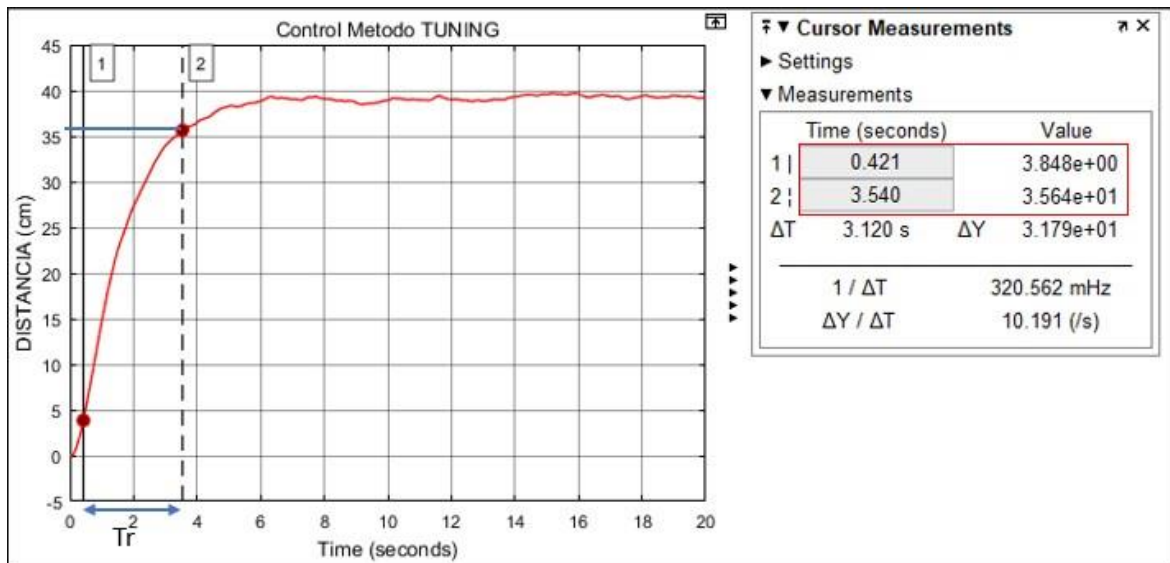


Figura 333 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 3.540 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.421 segundos

$Tr = 3.540 - 0.421 = 3.2$ segundos

➤ **Tp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Mp:**

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.75$$

De esta manera el rango es 39.96 para el límite superior y 38.56 para el límite inferior.

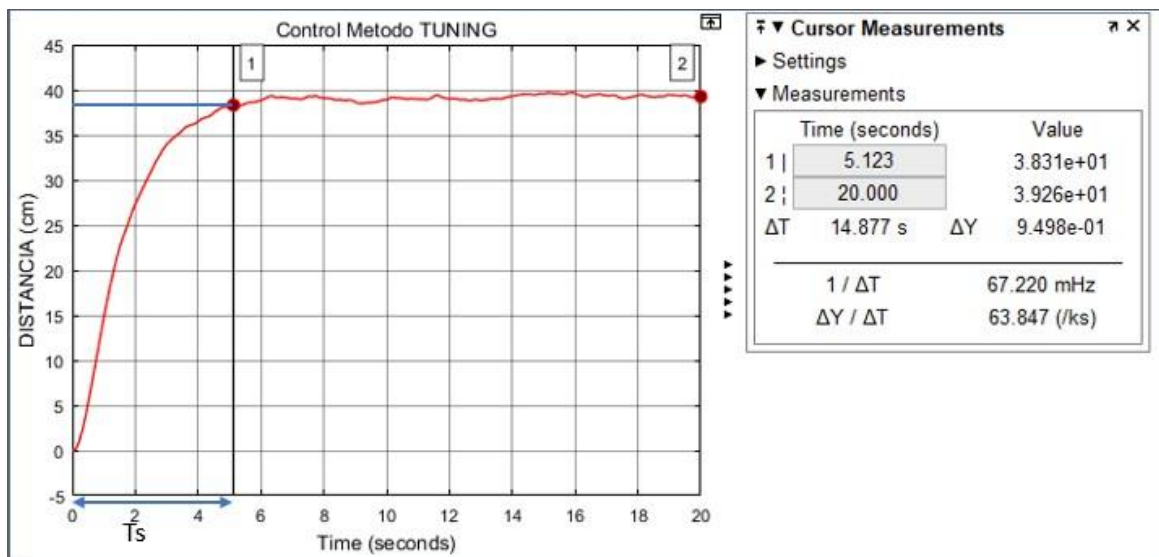


Figura 334 Controlador PD método tuning con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 5.123 segundos

9.4.4.2.4. Estudio del régimen estable del sistema de control PD por Tuning

- Ruido

En la figura 335 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 336 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

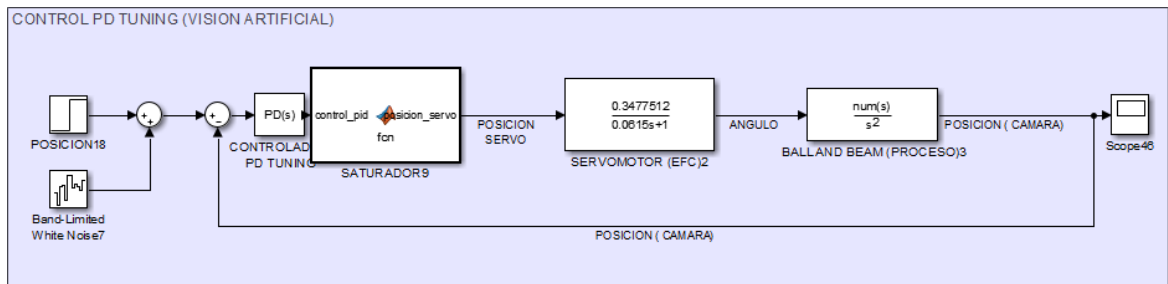


Figura 335 Diagrama de bloques control PD por tuning con ruido

se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica:

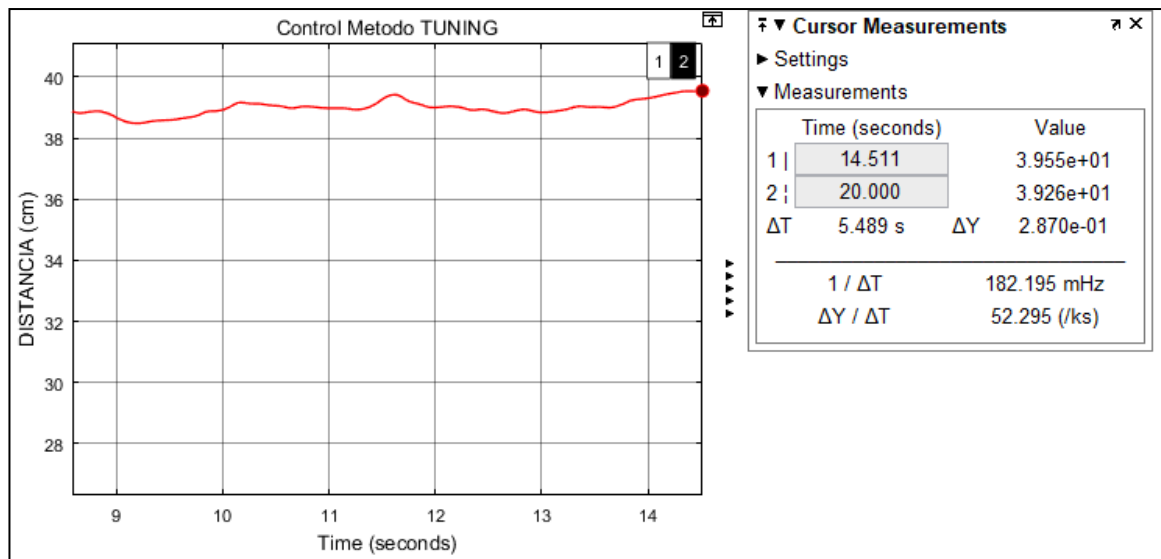


Figura 336 Respuesta estable controlador método tuning. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene no logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PD no es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 337 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 338 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

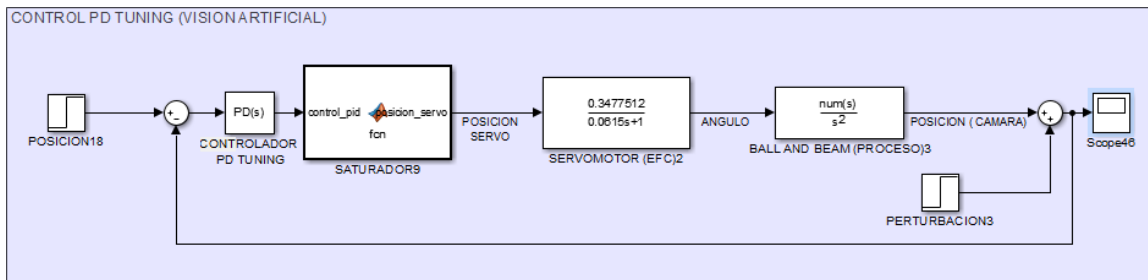


Figura 337 diagrama de bloques control PD método tuning perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 338 el controlador atenúa en un 100% la perturbación

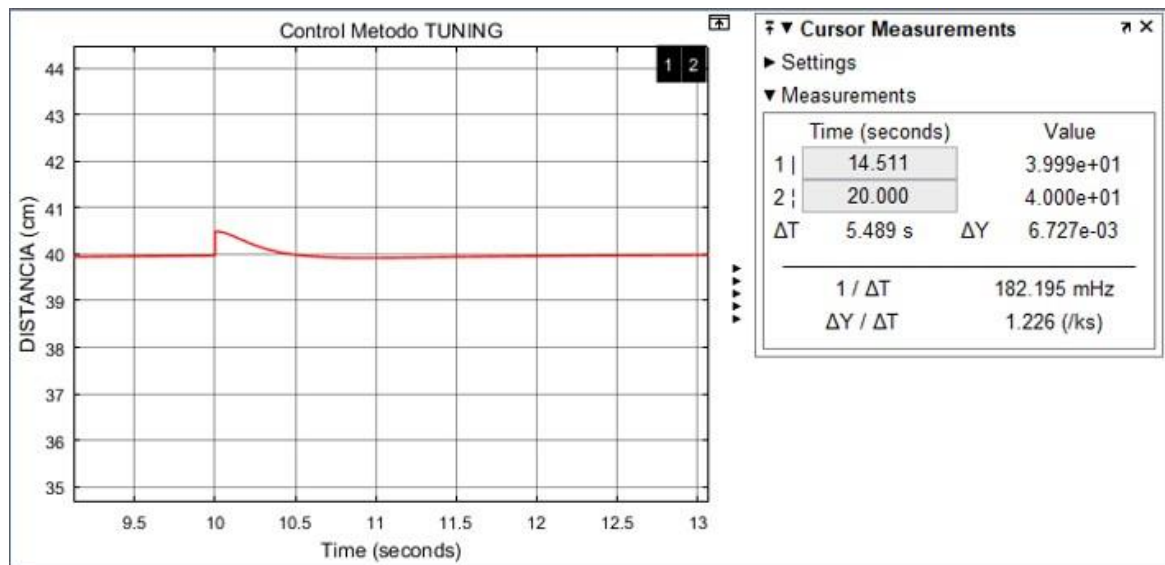


Figura 338 Respuesta etapa estable control PD método de Tuning sometido a perturbación. Autoría propia

9.4.4.2.5. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID por Tuning

- Condiciones normales

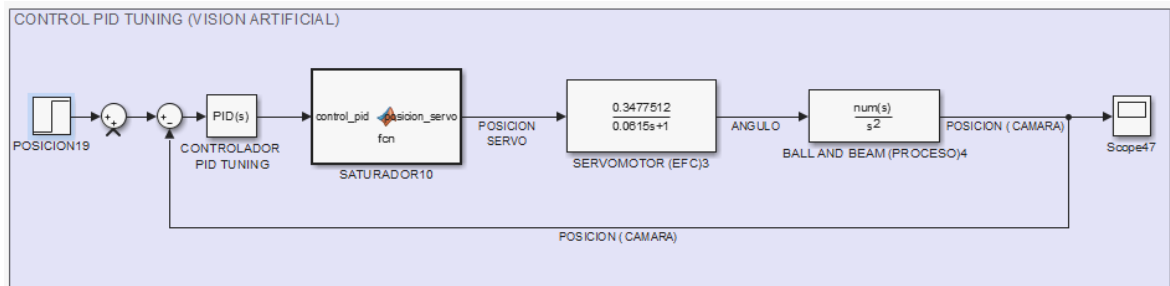


Figura 339 Diagrama de bloques controlador PID método de tuning. Autoría propia

En la figura 340 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

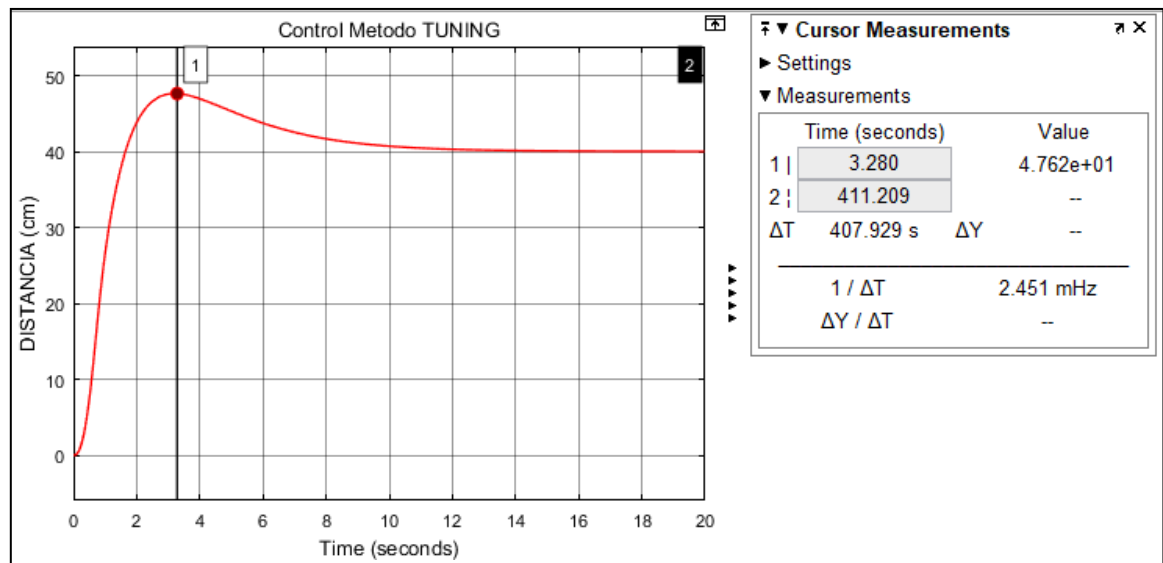


Figura 340 Controlador PID METODO TUNING. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

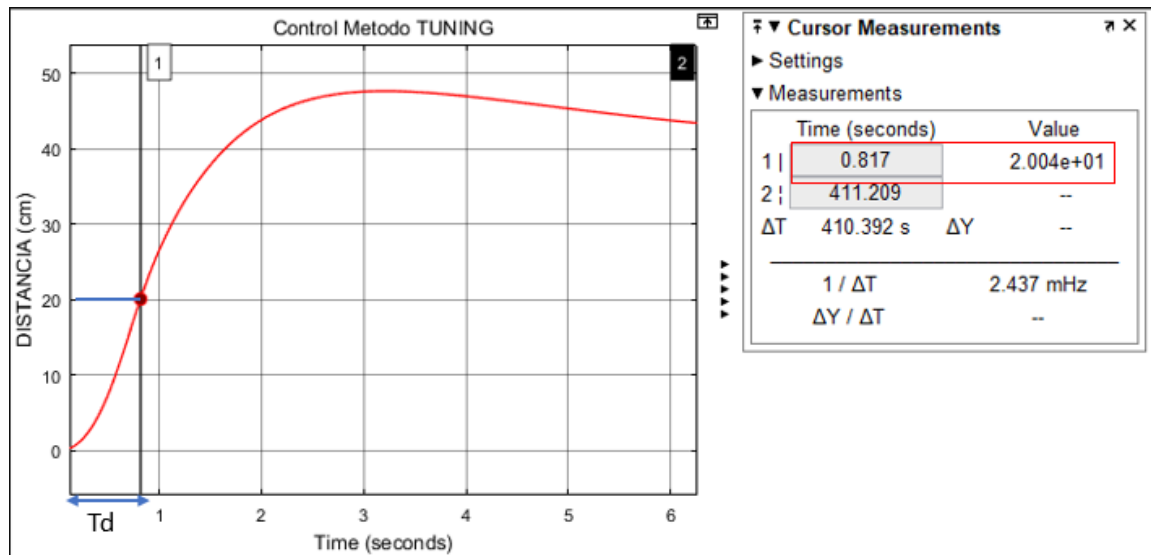


Figura 341 50% del punto de estabilización PID por METODO TUNING. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.817 segundos

➤ T_r :

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

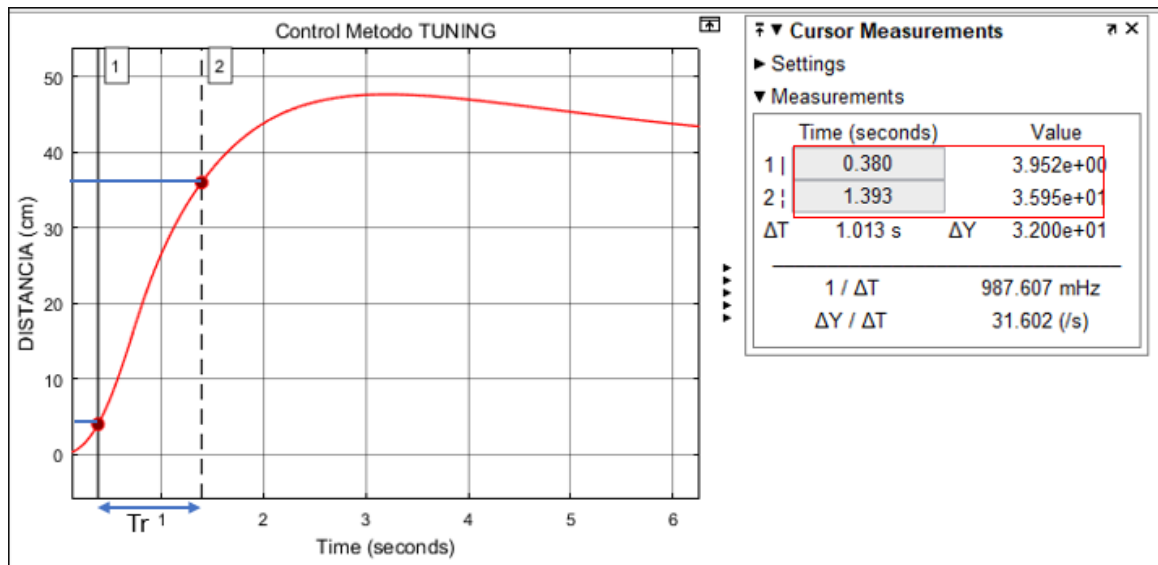


Figura 342 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 1.393 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.380 segundos

$T_r = 1.393 - 0.380 = 1.013$ segundos

➤ **Tp:**

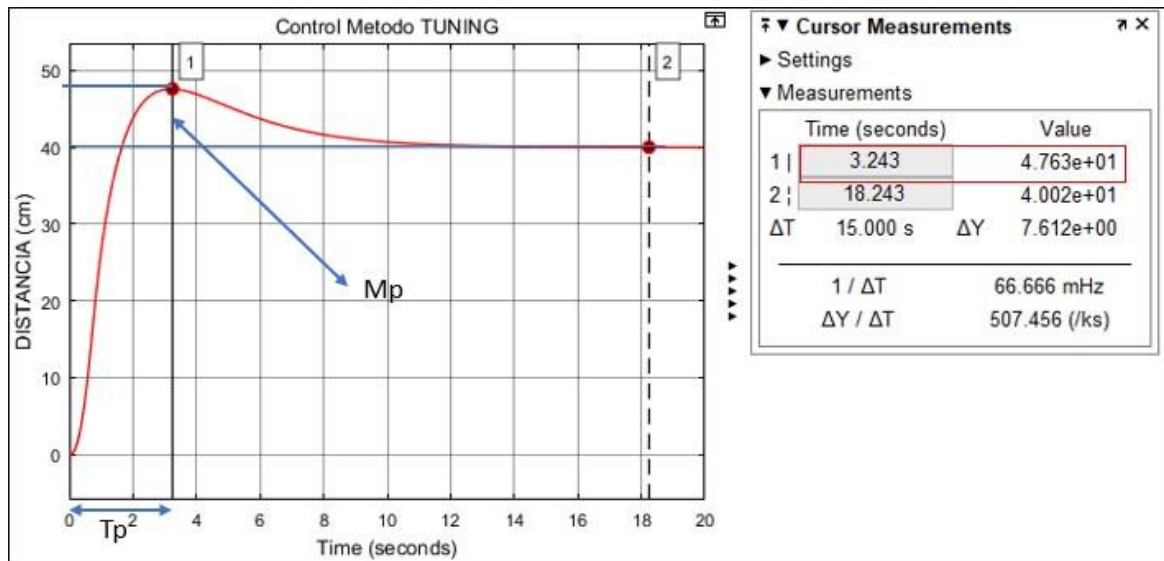


Figura 343 Tiempo pico máximo Control PID. Autoría propia

$T_p = 3.243$ segundos

➤ **Mp:**

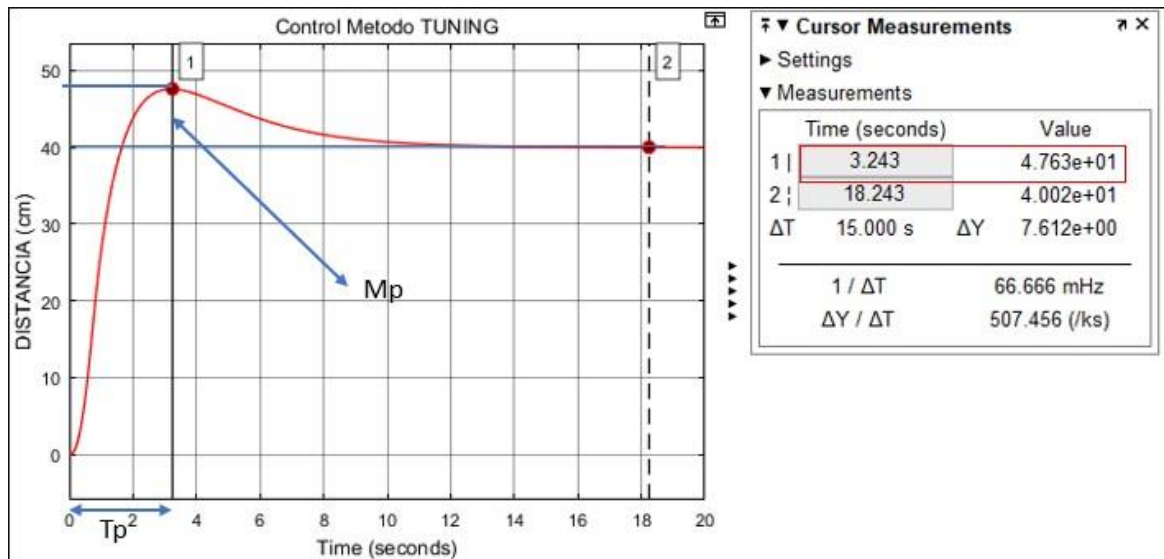


Figura 344 sobre impulso máximo Control PID. Autoría propia

$M_p = 47.63 - 40 = 7.63$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite inferior.

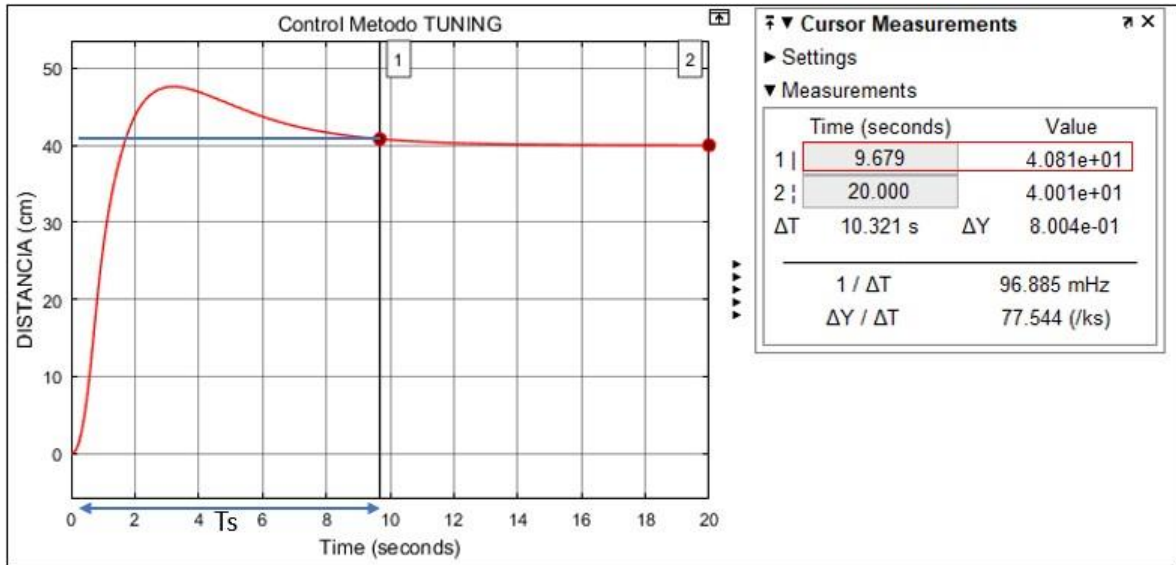


Figura 345 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 9.679 segundos

- Ruido

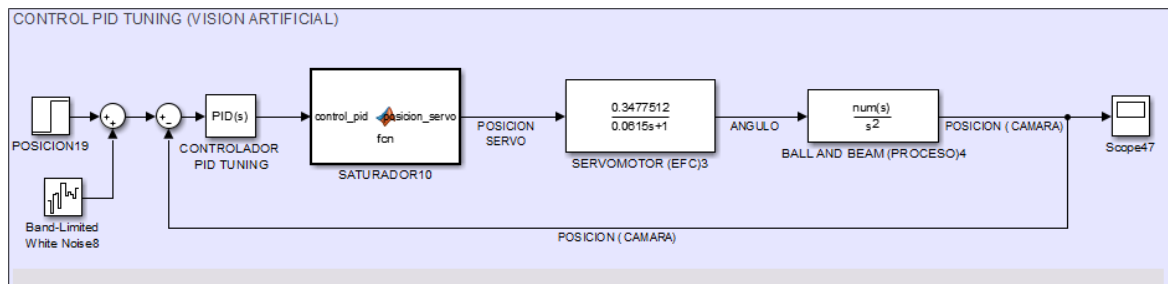


Figura 346 Diagrama de bloques control PID sometido a ruido. Autoría propia

En la figura 347 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

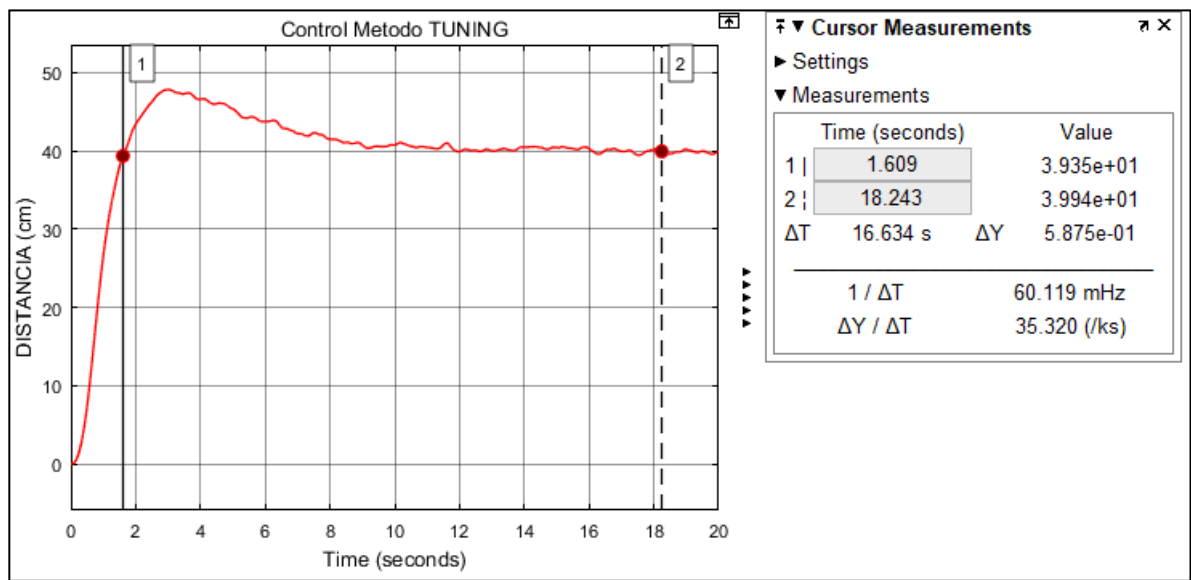


Figura 347 Respuesta controlador PD método tuning frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

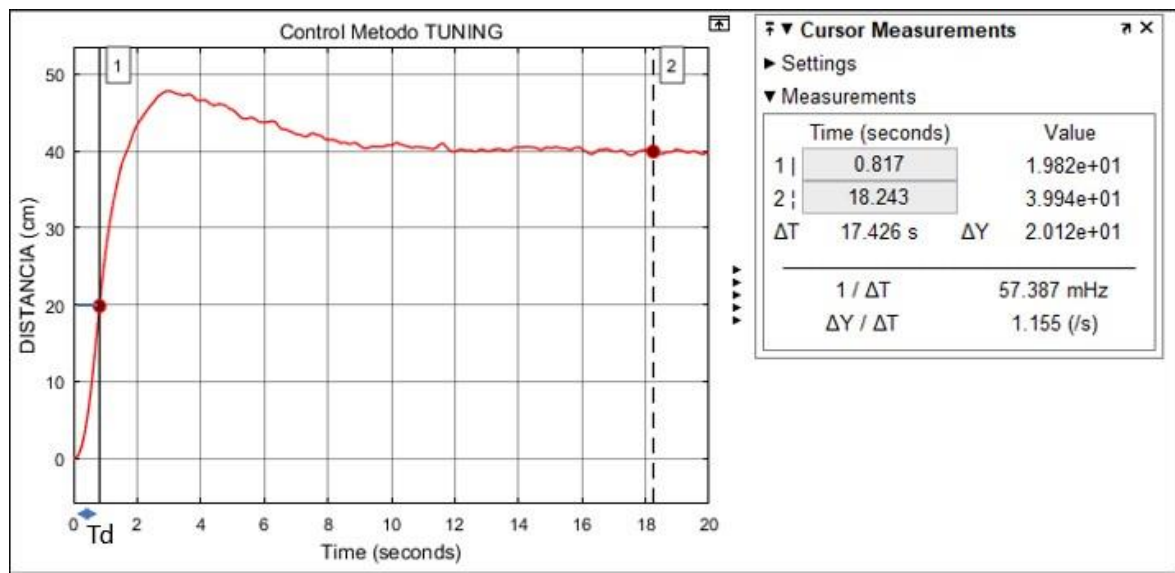


Figura 348 Control método tuning ante perturbación. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =1.379 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36cm

10% de VF= 4 cm

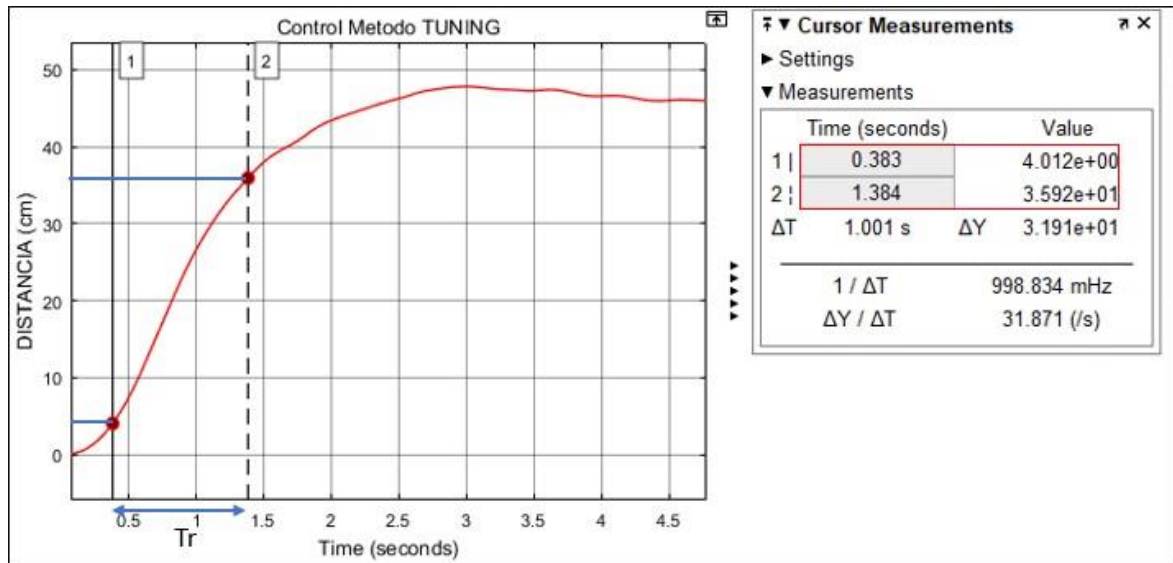


Figura 349 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 1.384 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.383 segundos

$Tr = 1.384 - 0.383 = 1$ segundos

➤ **Tp:**

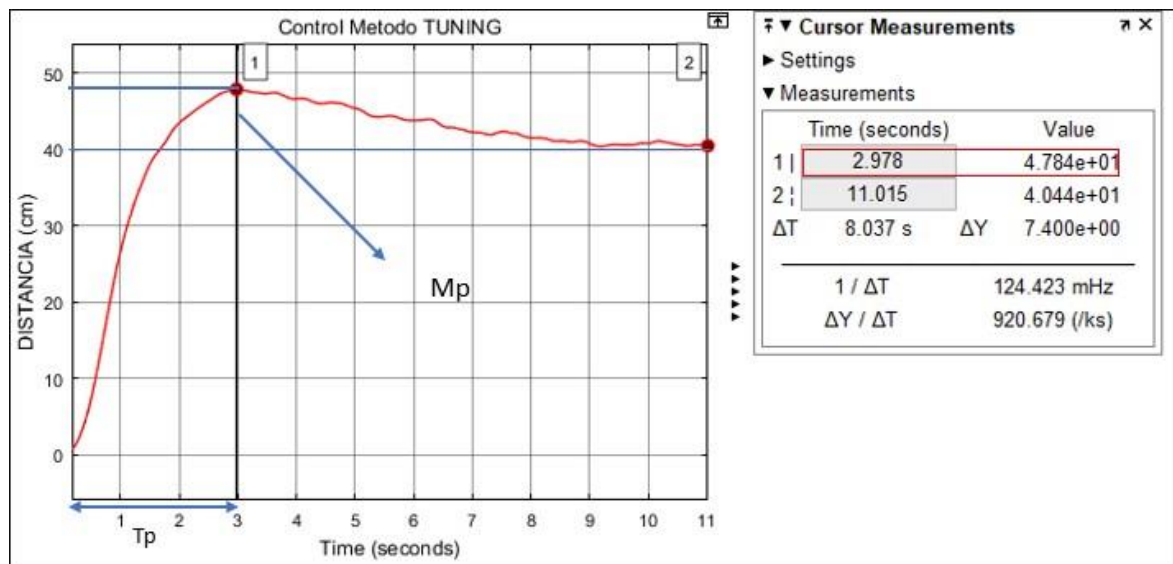


Figura 350 Tiempo pico máximo Control PID. Autoría propia

Tp = 2.978 segundos

➤ **Mp:**

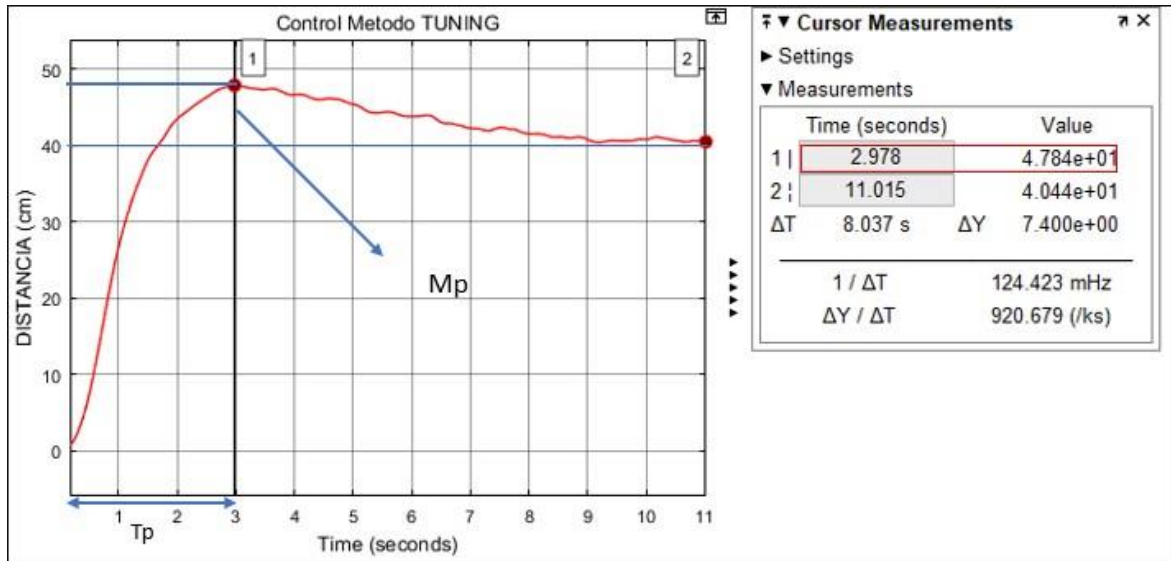


Figura 351 Pico máximo Control PID. Autoría propia

$$M_p = 47.84 - 40 = 7.84$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

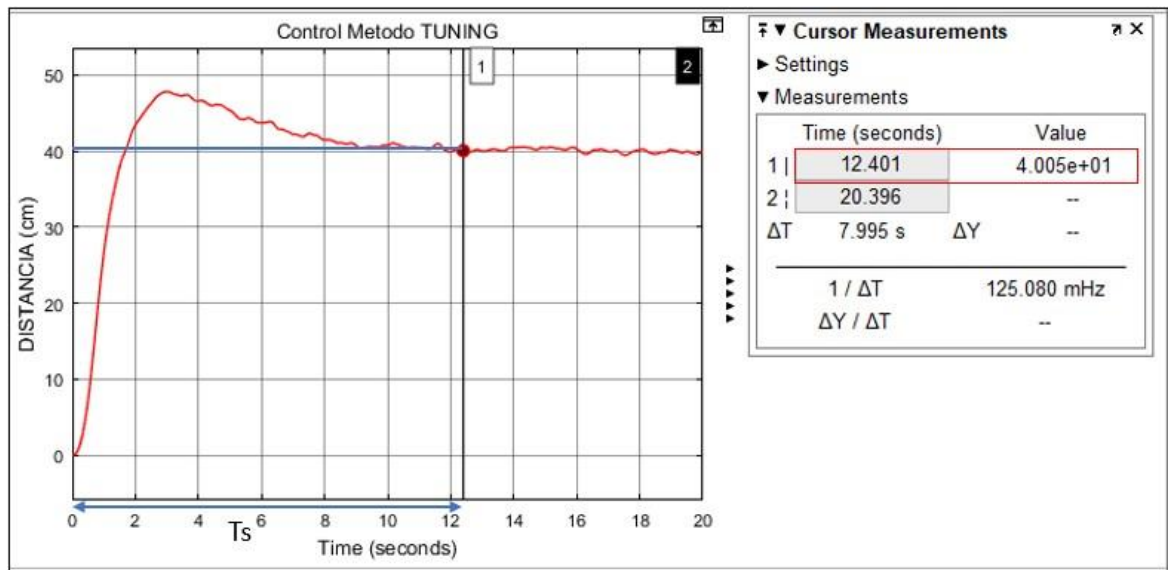


Figura 352 Controlador PID método tuning con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 12.401 segundos

9.4.4.2.6. Estudio del régimen estable del sistema de control PID por Tuning

- Ruido

En la figura 353 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 354 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

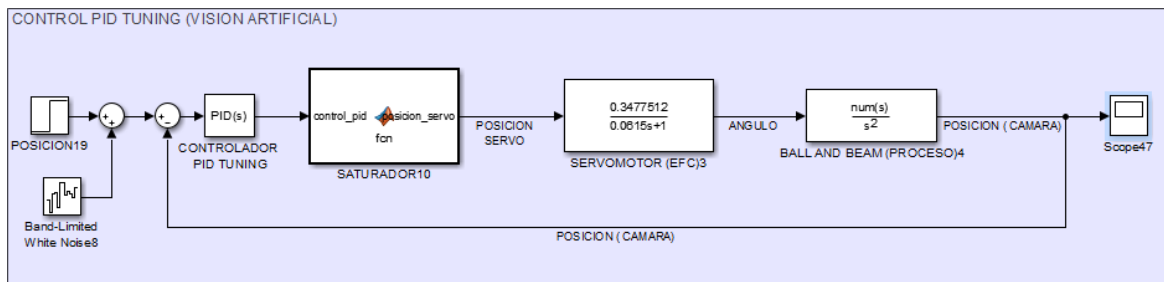


Figura 353 Diagrama de bloques control PID por tuning con ruido

se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

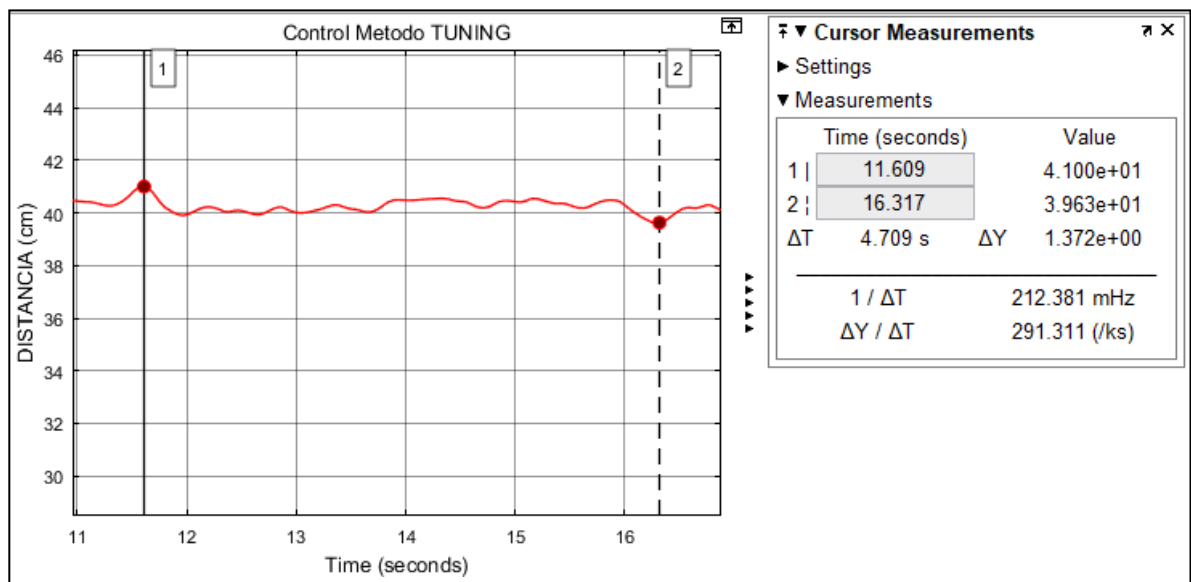


Figura 354 Respuesta transitoria controlador método tuning con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 355 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 356 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

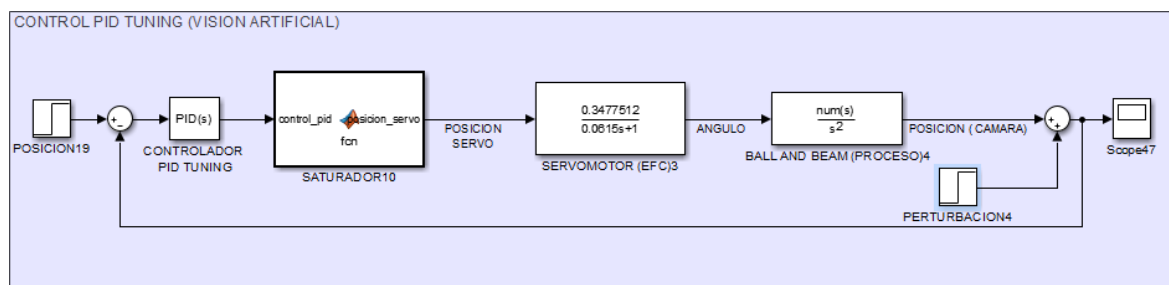


Figura 355 diagrama de bloques control PID método tuning perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 356 el controlador atenúa en un 100% la perturbación

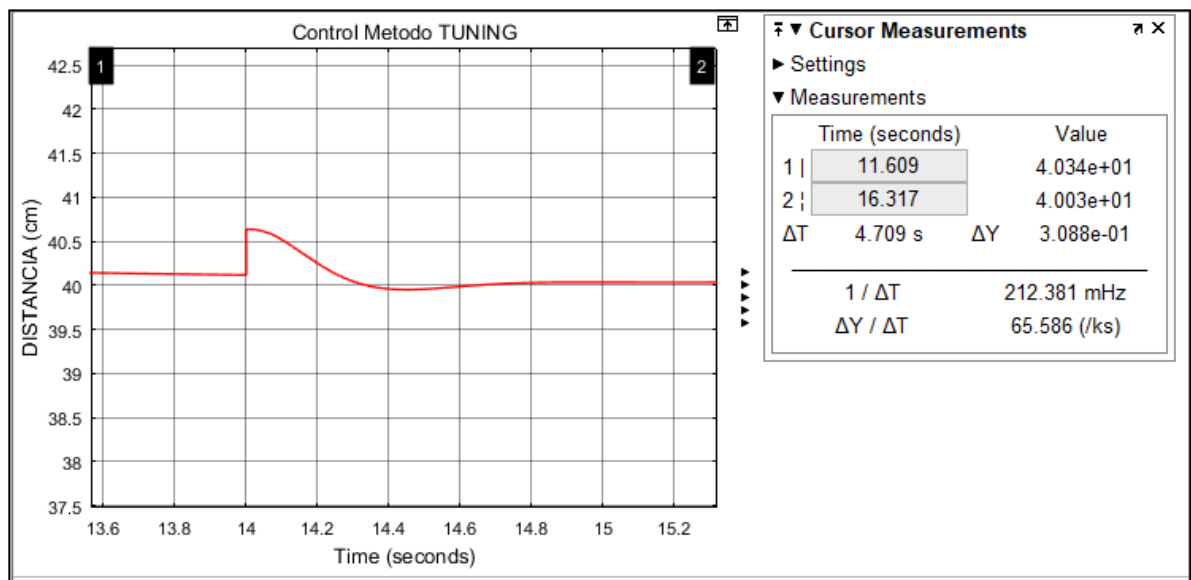


Figura 356 Respuesta etapa estable control PID método de Tuning sometido a perturbación.
Autoría propia

9.5. DISEÑO DE CONTROLADORES DE CONTROL EN CASCADA CON VISION ARTIFICIAL

En apartados anteriores se ha estudiado de manera detallada el sistema "ball and beam" objeto de este trabajo, tomando como entrada de este la posición en cm a la que se desea controlar y como salida la posición lineal del carro respecto a los extremos de la barra. En este apartado, se plantea el esquema de control más parecido a la realidad, en el que la acción de control sobre la que se puede actuar no es solo la medición de posición de la bola, sino que también el ángulo del servomotor.

Efectivamente, no se puede perder de vista que el único actuador del sistema es el servomotor, el cual trabaja usando como variable un ángulo medido sobre su eje, que puede oscilar entre 0° y 330° , pero a la hora del control se va a utilizar solamente una variación de ángulo de 0 a 161° , ya que con esta el sistema ball and beam alcanza una buena inclinación y declinación para la oscilación de la bola.

En Control de Sistemas, es típico encontrar situaciones en las que las perturbaciones puedan llegar a afectar a la salida de los actuadores. Si no se hace nada para evitarlo, estas perturbaciones inciden sobre el sistema durante un tiempo sin que se realice una acción de control en su contra, es por eso que la idea es evitar que este efecto se acumule y acabe afectando de manera negativa a la salida.

Por tal razón, se utiliza un lazo primario (externo o maestro) el cual establece a un lazo secundario o esclavo su señal de referencia, y así cualquier perturbación que

afecte al sistema será detectada y compensada por el controlador esclavo, antes de que afecte la variable de proceso maestra o primaria, siendo mejorada la respuesta. Cabe destacar que es de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema que el lazo secundario sea más rápido que el primario.

9.5.1. Control en cascada 1

9.5.1.1. Control de lazo interno por tercer método de Z&N

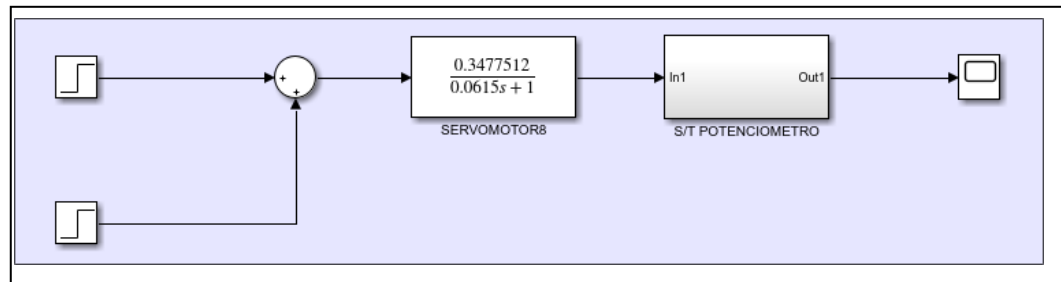


Figura 357 Diagrama de bloques lazo interno. Autoría propia

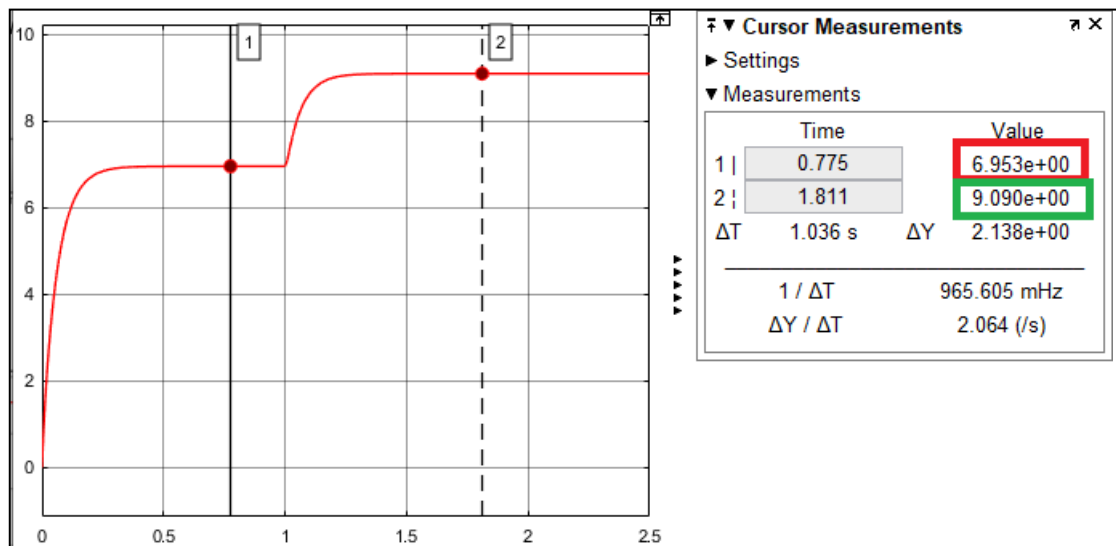


Figura 358 Respuesta a os escalones para identificación. Autoría propia

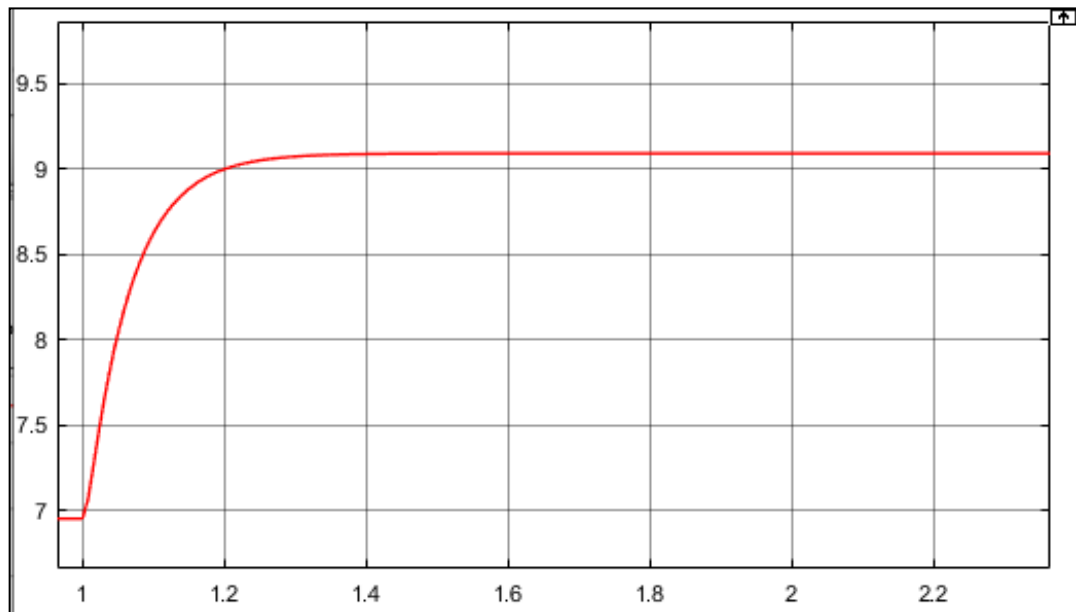


Figura 359 respuesta segundo escalón. Autoría propia

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{9.090 - 6.953}{500 - 291} = \frac{2.137}{209} = 0.01022488038$$

$$t_{28} = (2.137 * 28,3\%) + 6.953 = 7.557771$$

$$t_{28} = 1.027 - 1 = 0.027$$

$$t_{63} = (2.137 * 63,2\%) + 6.953 = 8.303584$$

$$t_{63} = 1.068 - 1 = 0.068$$

Al encontrar los tiempos en los cuales se establece la señal de salida le aplicamos las ecuaciones para hallar el τ del sistema y el tiempo muerto.

$$\tau = \frac{3}{2} (t_{63} - t_{28}) \quad (51)$$

$$\tau = \frac{3}{2} (0.068 - 0.027)$$

$$\tau = 0.0615$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (52)$$

$$t_m = 0.068 - 0.0615$$

$$t_m = 0.0065$$

Tabla 32 Parámetros para las constantes del controlador. Autoría propia

	Kc	Ti	Td
P	$\frac{1}{k} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$		
PI	$\frac{0.9}{k} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_o$	
PID	$\frac{1.2}{k} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$	$2 t_o$	$\left(\frac{1}{2} \right) t_o$

Por medio de la Tabla de Z&N podemos guiarnos para iniciar a realizar el controlador PID.

El Kp que se obtiene es:

$$k_p = k_c \quad (53)$$

$$k_p = \frac{1.2}{0.01022488038} \left(\frac{0.0065}{0.0615} \right)^{-1} = 1110.413592$$

El Ki que se obtiene es:

$$k_i = \frac{k_p}{t_i} \quad (54)$$

$$t_i = 2 * 0.0065 = 0.013$$

$$k_i = 85416.43015$$

El Kd que se obtiene es:

$$k_d = k_p * t_d \quad (55)$$

$$t_d = \left(\frac{1}{2} \right) * 0.0065 = 0.00325$$

$$k_d = 3.608844174$$

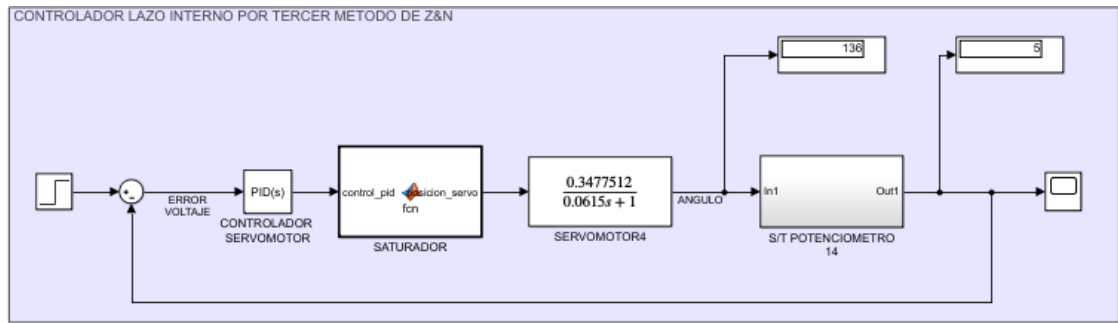


Figura 360 Controlador lazo interno por tercer método de Z&N. Autoría propia

Procedemos a comprobar el controlador del primer proceso, con un set point de 5V:

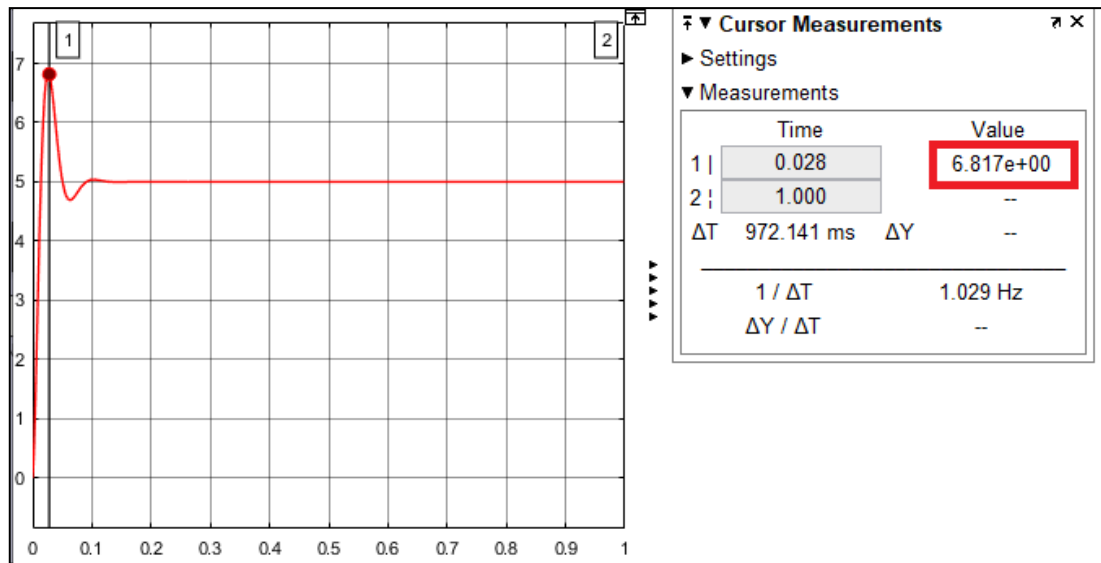


Figura 361 Respuesta controlador. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 361 la respuesta converge en la posición deseada, pero en el régimen transitorio el sistema tiene un pico mayor al 10% de la entrada, por lo tanto, se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 33 Ajustes parámetros del controlador. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	1110,413592	-	-	-	-	-	-	900	-
Ki	85416,43015	70000	Mejoro	50000	Mejoro	20000	Mejoro	-	Mejoro
Kd	3,608844174	-	-	-	-	-	-	-	-

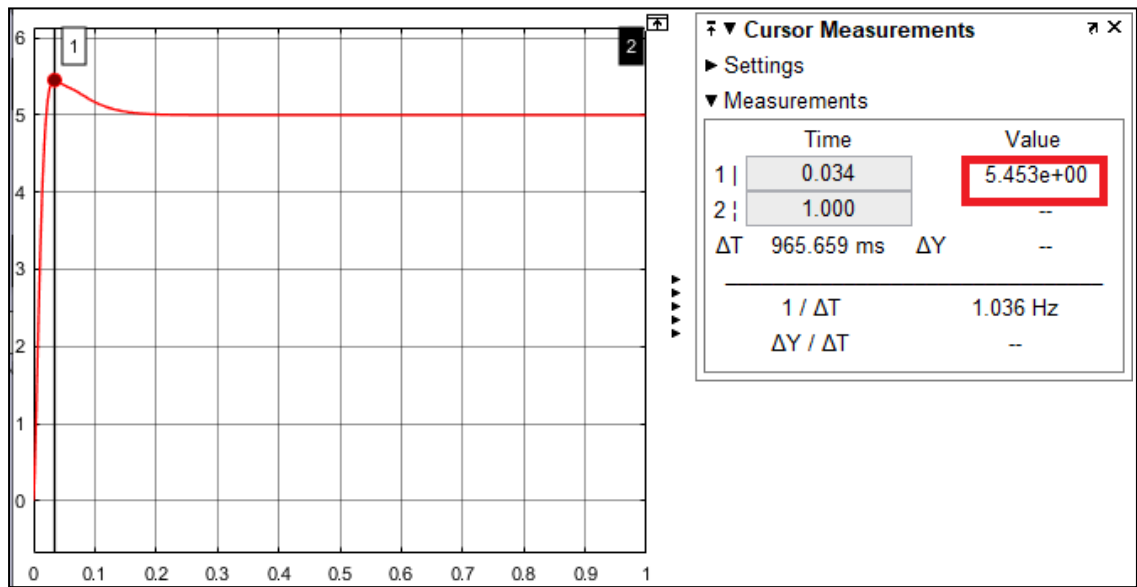


Figura 362 Respuesta salida controlador ajustado. Autoría propia

9.5.1.2. Control de lazo externo por método Tuning

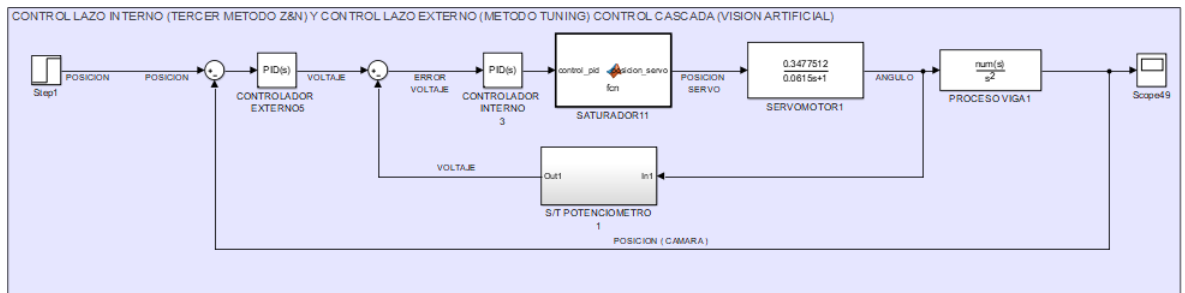


Figura 363 Diagrama de bloques control Cascada. Autoría propia

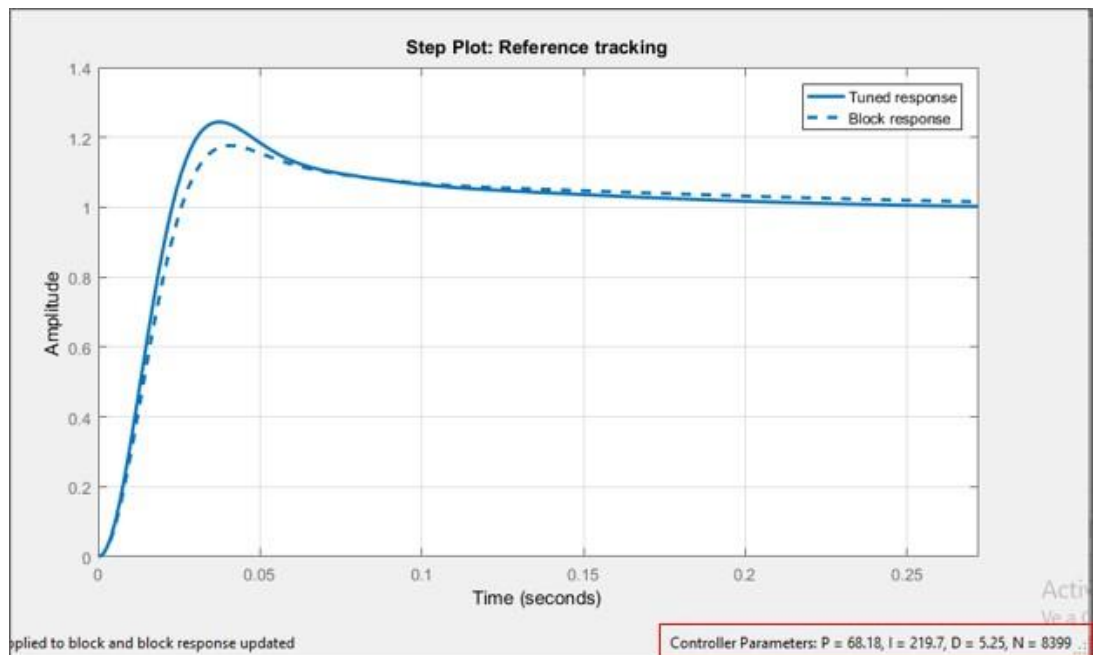
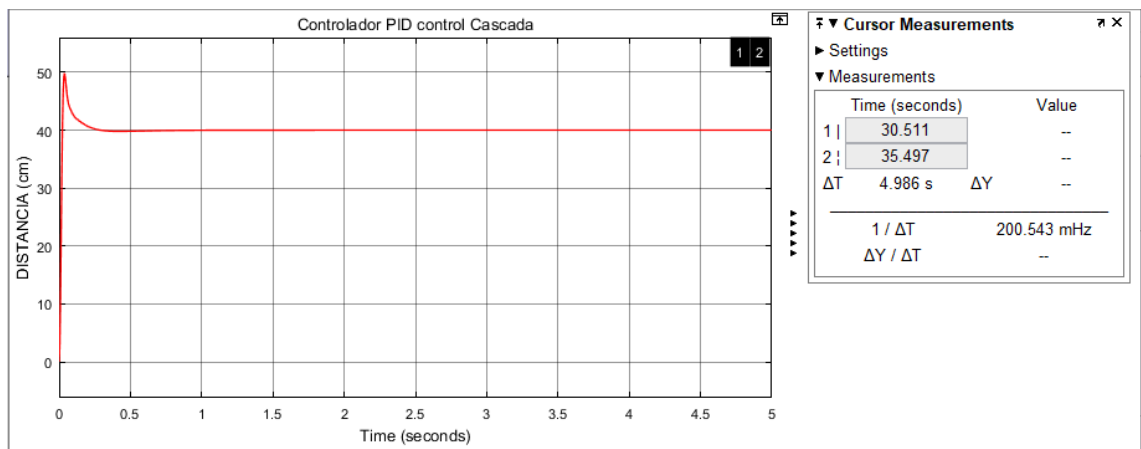


Figura 364 Parámetros del controlador lazo externo método TUNING. Autoría propia



Como se puede observar en la gráfica de la figura anterior la respuesta converge en la posición deseada, pero en el régimen transitorio el sistema tiene un pico mayor al 10% de la entrada, por lo tanto, se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 34 Ajuste ensayo - error controlador externo. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	68,18	80	Empeoro	-	Mejoro	-	Mejoro	4,1	Mejoro
Ki	219,8	-		-		1,1		-	
Kd	5,25	-		4		2,5		-	

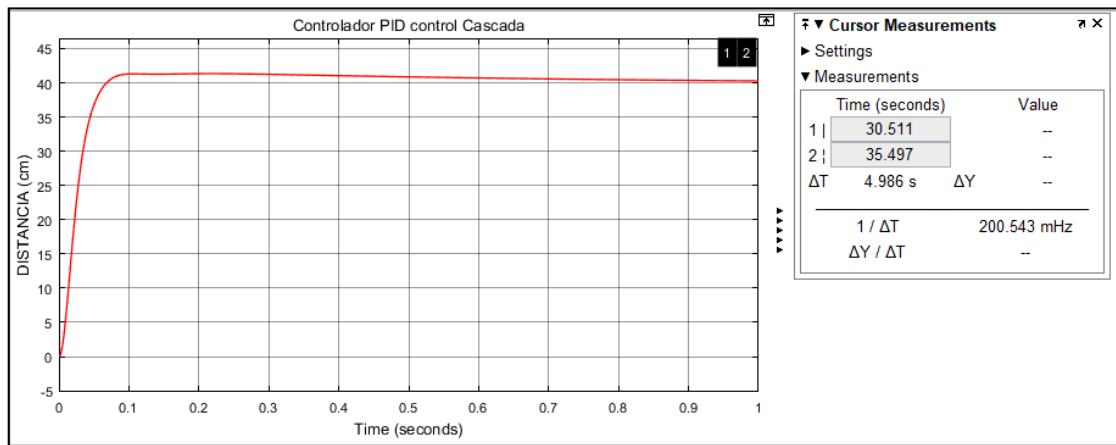


Figura 365 Respuesta controlador PID ajustado. Autoría propia

9.5.2. Control en cascada 2

9.5.2.1. Control de lazo interno por método de Dahlin

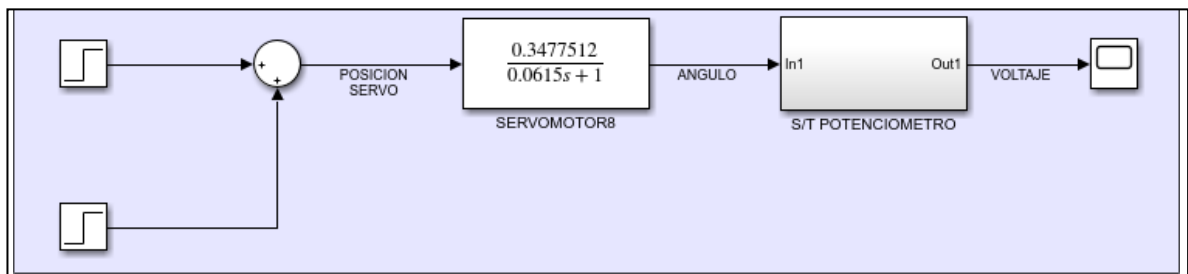


Figura 366 Identificación control lazo interno por método de Dahlin. Autoría propia

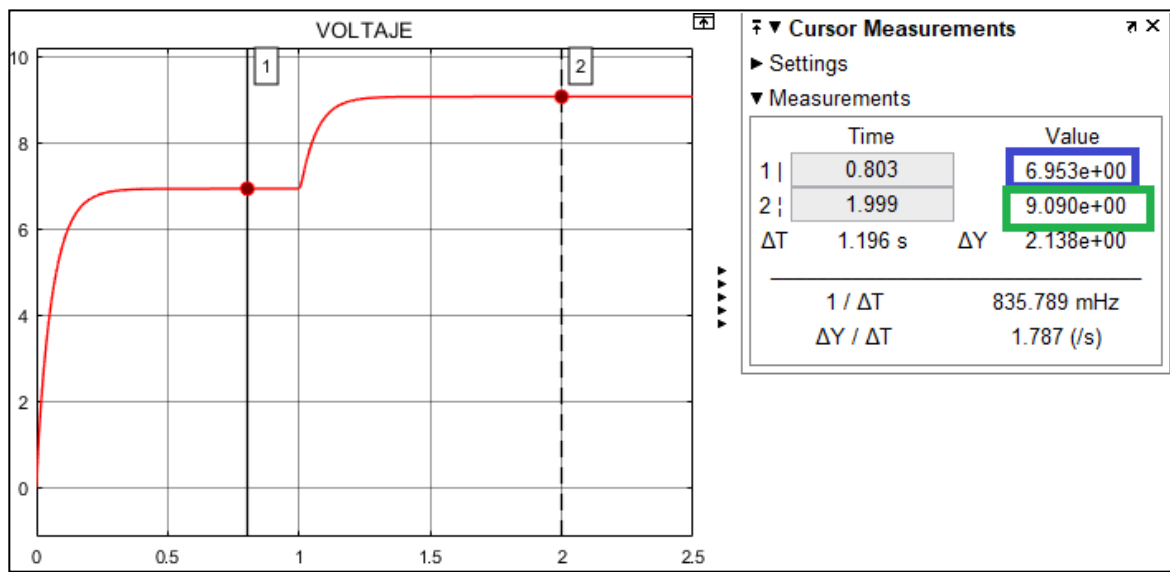


Figura 367 Sistema sometido a Dos setpoint. Autoría propia

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{9.090 - 6.953}{500 - 291} = \frac{2.137}{209} = 0.01022488038$$

$$t_{28} = (2.137 * 28,3\%) + 6.953 = 7.557771$$

$$t_{28} = 1.027 - 1 = 0.027$$

$$t_{63} = (2.137 * 63,2\%) + 6.953 = 8.303584$$

$$t_{63} = 1.068 - 1 = 0.068$$

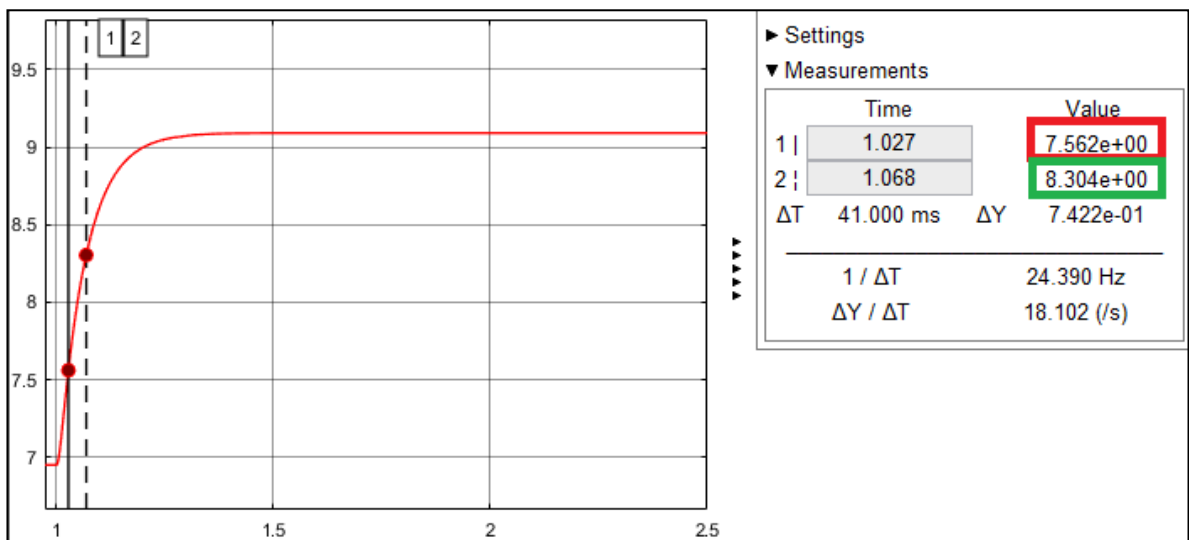


Figura 368 segundo escalón método Dahlin. Autoría propia

Al encontrar los tiempos en los cuales se establece la señal de salida le aplicamos las ecuaciones para hallar el tao del sistema y el tiempo muerto.

$$\tau = \frac{3}{2} (t_{63} - t_{28}) \quad (56)$$

$$\tau = \frac{3}{2} (0.068 - 0.027)$$

$$\tau = 0.0615$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (57)$$

$$t_m = 0.068 - 0.0615$$

$$t_m = 0.0065$$

Teniendo el tiempo muerto, el tao y la ganancia del sistema se procede a hallar el controlador por método de Dahlin:

Tabla 35 Método PID por Dahlin

Controlador	Parámetro de Ajuste	Ecuación
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	k_p	$\frac{1,2}{2k} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$
	τ_i	τ
	τ_d	$\frac{t_0}{2}$

El Kp que se obtiene es:

$$k_p = \frac{1.2}{2 * 0.01022488038} \left(\frac{0.0065}{0.0615} \right)^{-1} = 555.2067962$$

El Ki que se obtiene es:

$$k_i = \frac{k_p}{t_i} \quad (58)$$

$$t_i = 0.0615$$

$$k_i = 9027.752784$$

El Kd que se obtiene es:

$$k_d = k_p * t_d \quad (59)$$

$$t_d = \left(\frac{1}{2}\right) * 0.0065 = 0.00325$$

$$k_d = 1.804422088$$

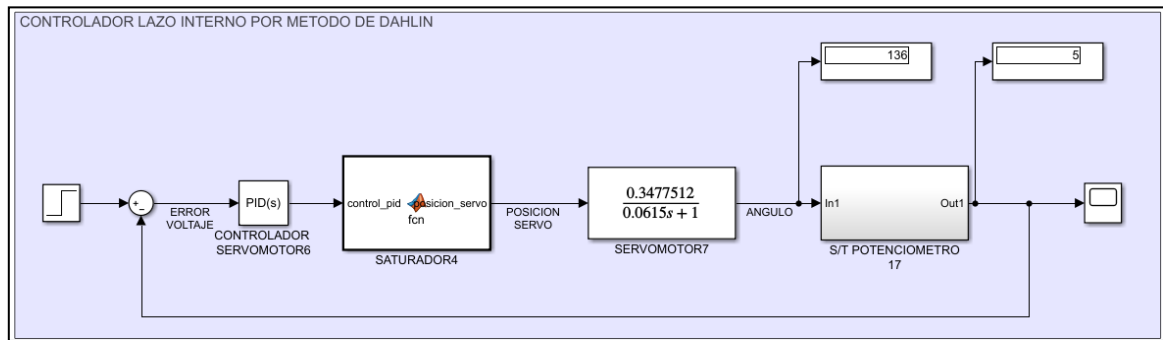


Figura 369 Controlador lazo interno método de DAHLIN. Autoría propia

Con un set point de 5 v se obtiene la siguiente respuesta:

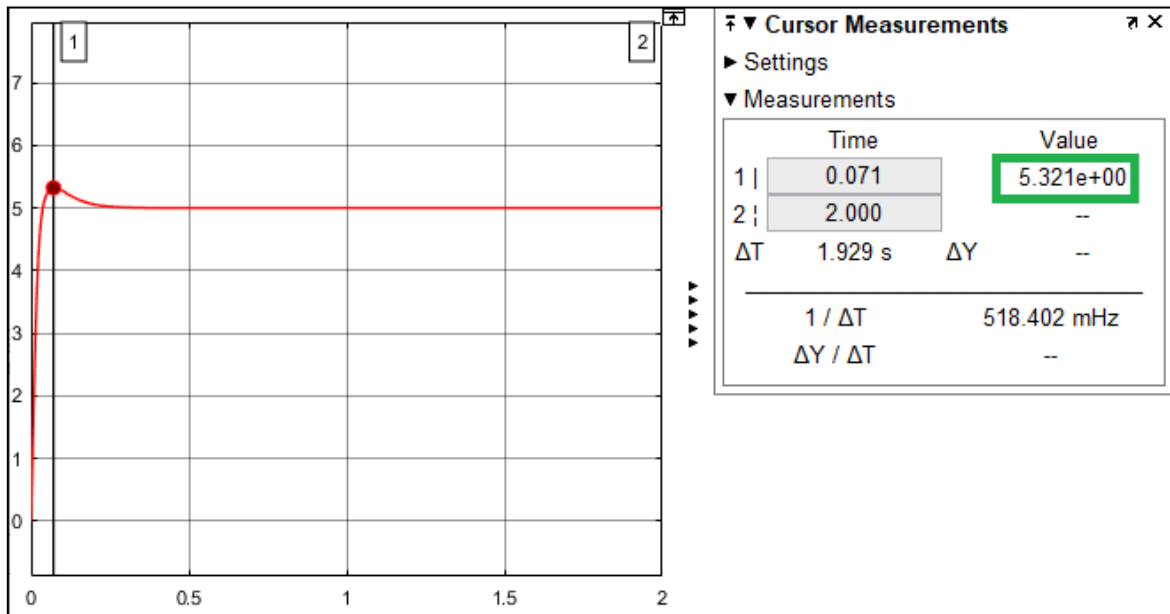


Figura 370 Respuesta controlador lazo interno método de DAHLIN. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura 370 la respuesta converge en la posición deseada y con un tiempo bastante rápido, además en el régimen transitorio el sistema tiene un pico menor al 10% de la entrada, por lo tanto, este tipo de respuesta se considera afable para este sistema.

9.5.2.2. Control de lazo externo por método Tuning

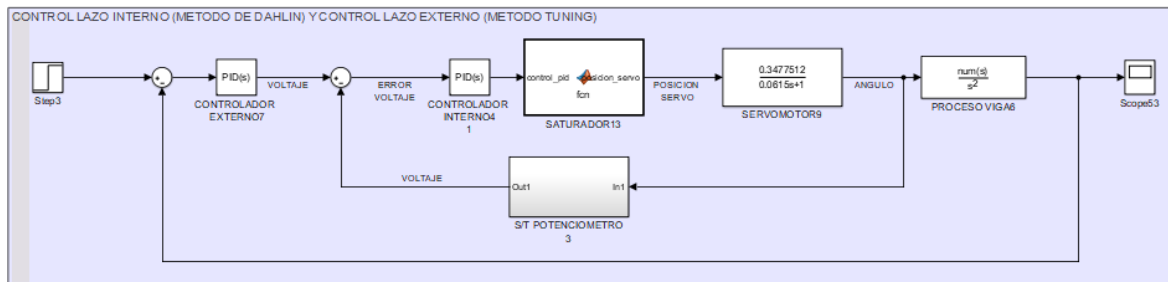


Figura 371 Diagrama de bloques control Cascada. Autoría propia

Controller parameters

Source: [Compensator formula](#)

Proportional (P):

Integral (I):

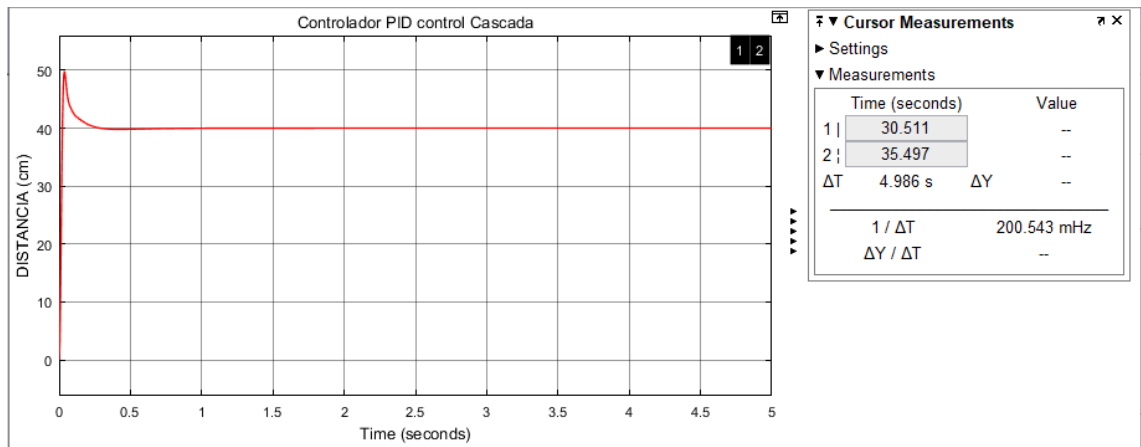
Derivative (D):

Filter coefficient (N):

[Tune...](#)

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Figura 372 Parámetros del controlador lazo externo método TUNING. Autoría propia



Respuesta del sistema con controlador en lazo externo por método tuning. Autoría propia

Como se puede observar en la gráfica de la figura anterior la respuesta converge en la posición deseada, pero en el régimen transitorio el sistema tiene un pico mayor

al 10% de la entrada, por lo tanto, se realiza una tabla de ajuste para este controlador, para así mejorar la señal de salida.

Tabla 36 Ajuste ensayo - error controlador externo. Autoría propia

TABLA ENSAYO Y ERROR									
Parámetro	Valor inicial	Prueba 1	Resultado	Prueba 2	Resultado	Prueba 3	Resultado	Prueba 4	Resultado
Kp	14,25	20	Empeoro	-	Mejoro	-	Mejoro	2	Mejoro
Ki	11,689	-		-		0,388		-	
Kd	9,84	-		2		2,4		-	

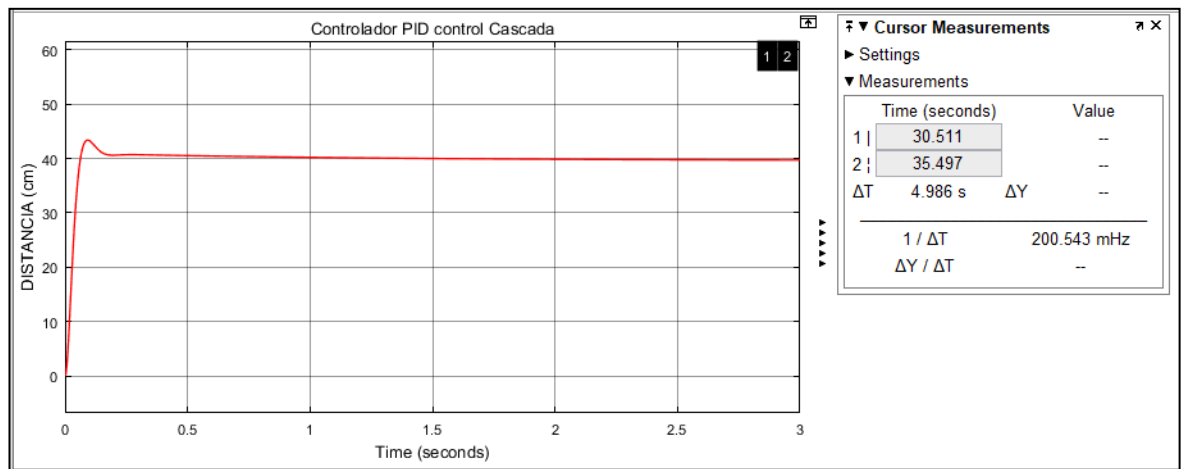


Figura 373 Respuesta controlador PID ajustado. Autoría propia

9.5.3. Validación de la metodología implementada para controladores obtenidos

9.5.3.1. Validación estadística de los resultados

9.5.3.1.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método TUNING

- Condiciones normales

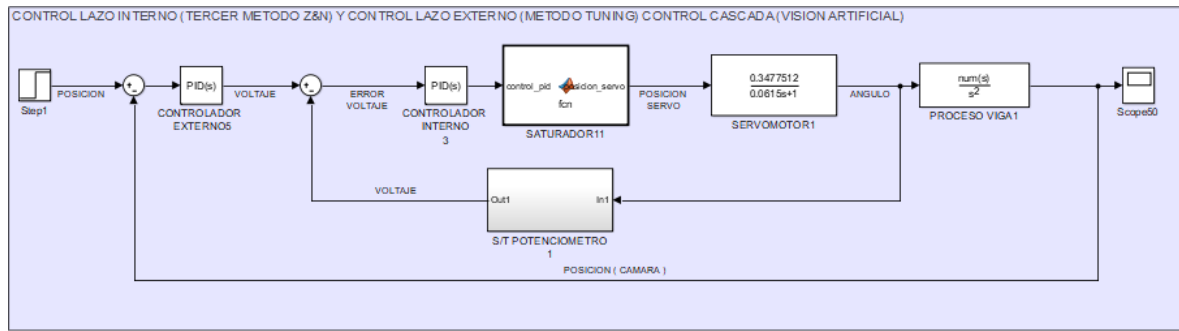


Figura 374 Diagrama de bloques controlador PID. Autoría propia

En la figura 375 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

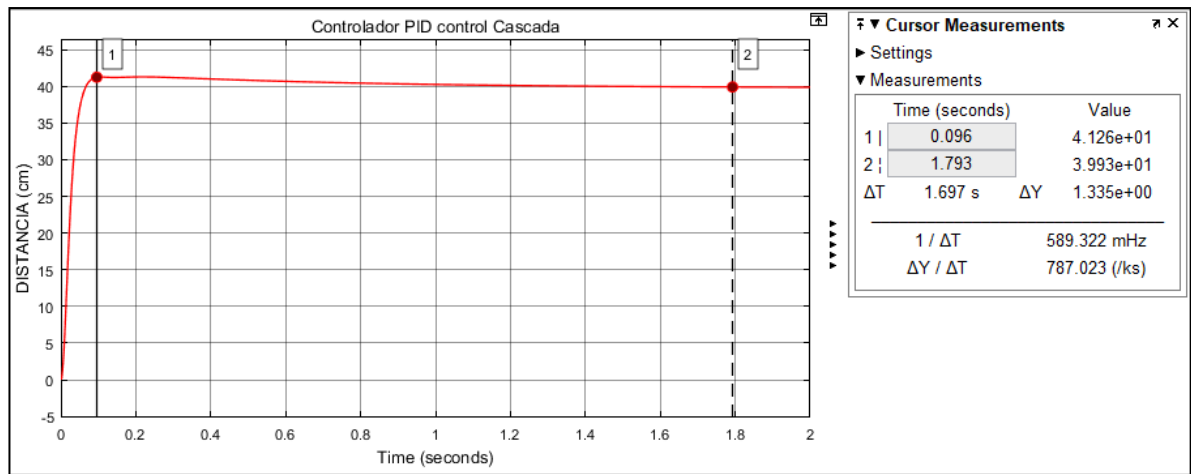


Figura 375 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

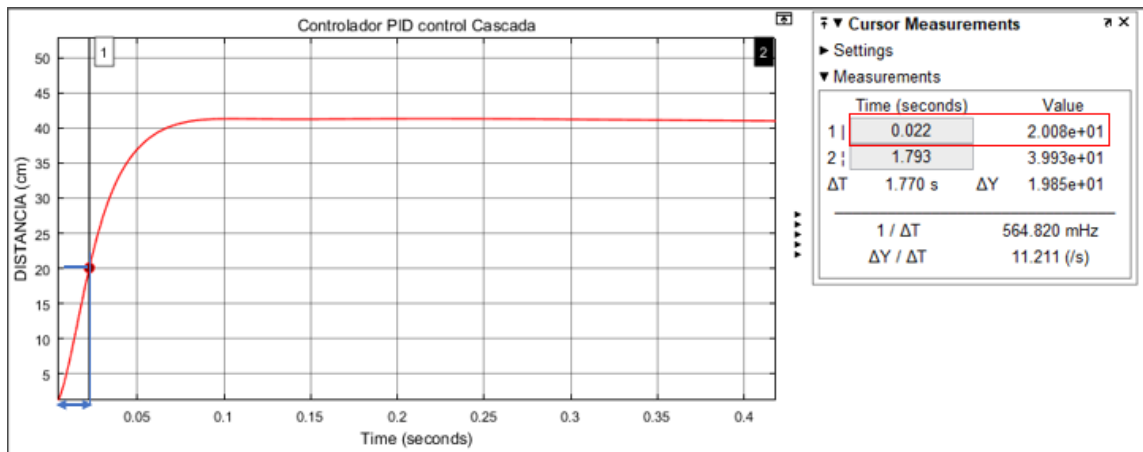


Figura 376 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.068 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

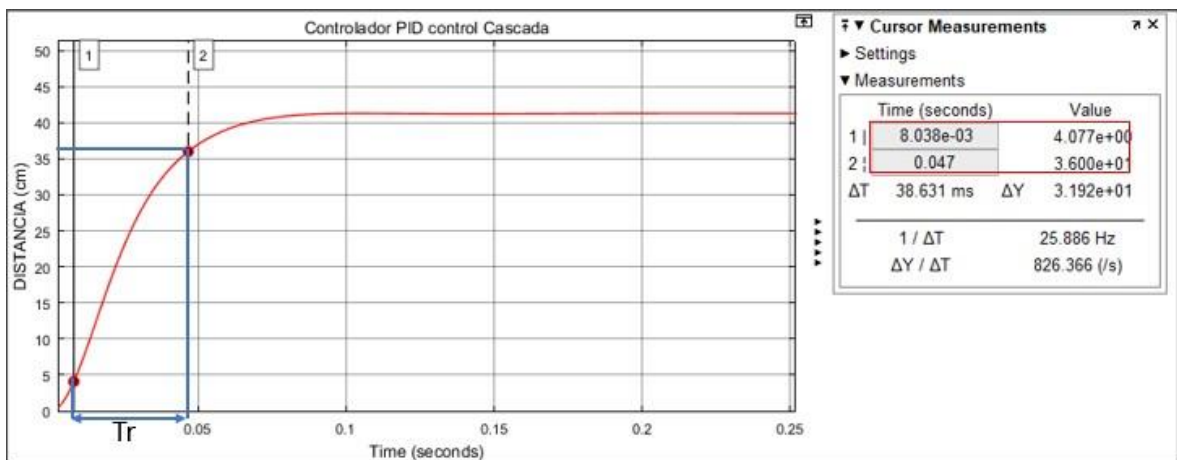


Figura 377 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.047 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.008 segundos

$Tr = 0.047 - 0.008 = 0.039$ segundos

➤ **Tp:**

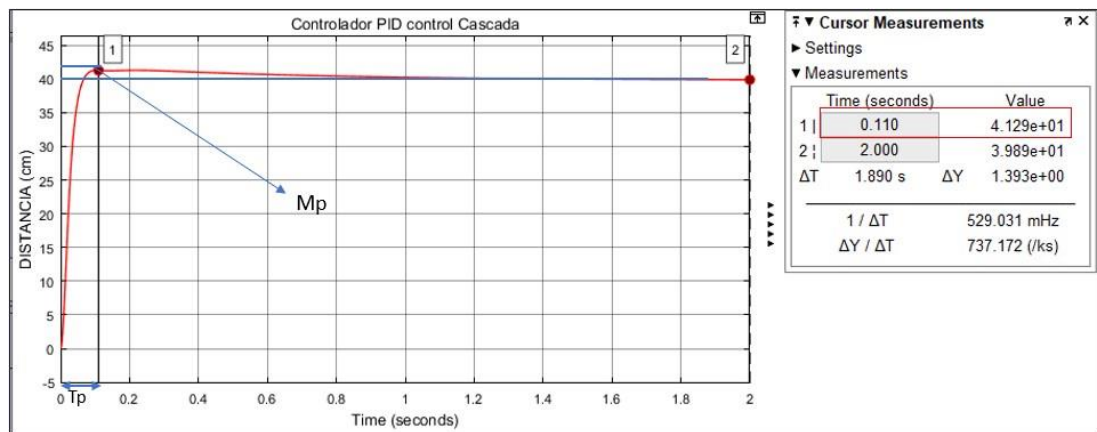


Figura 378 Tiempo para el primer pico máximo del sistema. Autoría propia

$T_p = 0.110$ segundos

- **Mp:**

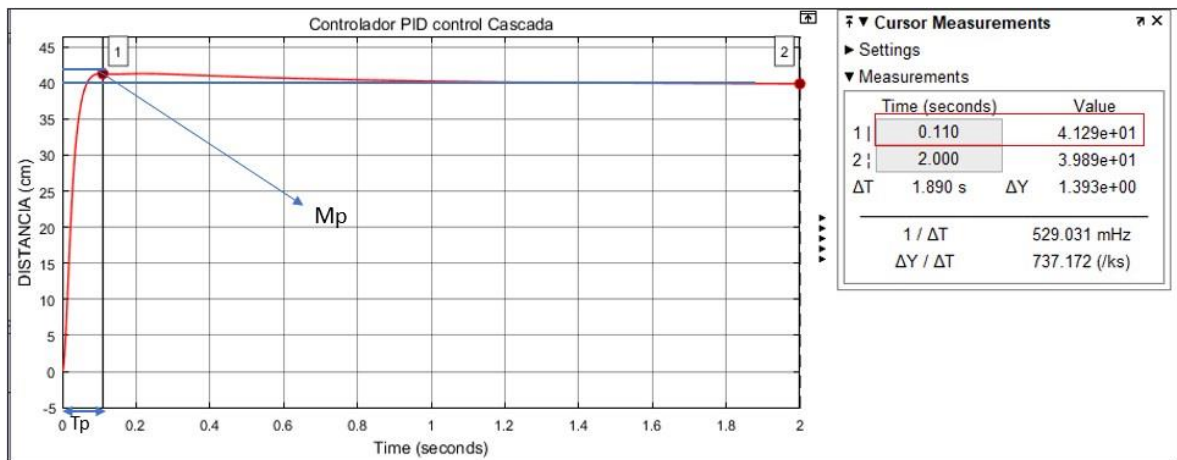


Figura 379 Mayor pico presentado en la salida del sistema. Autoría propia

$$M_p = 41.29 - 40 = 1.29$$

- **Ts:**

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

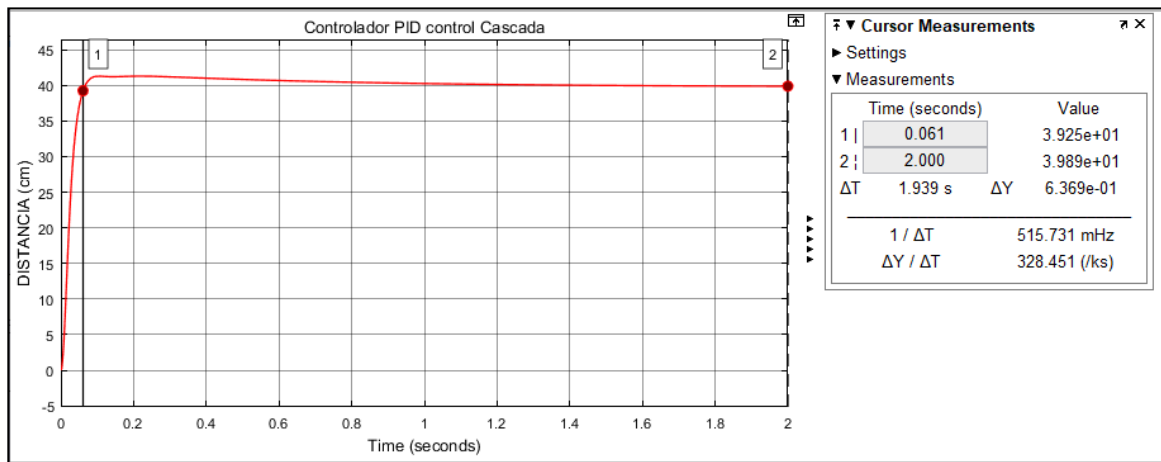


Figura 380 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.061 segundos

- Ruido

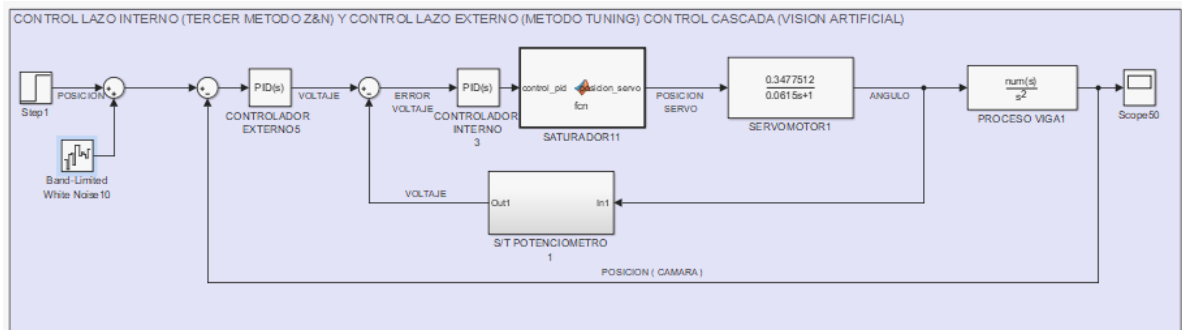


Figura 381 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 382 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

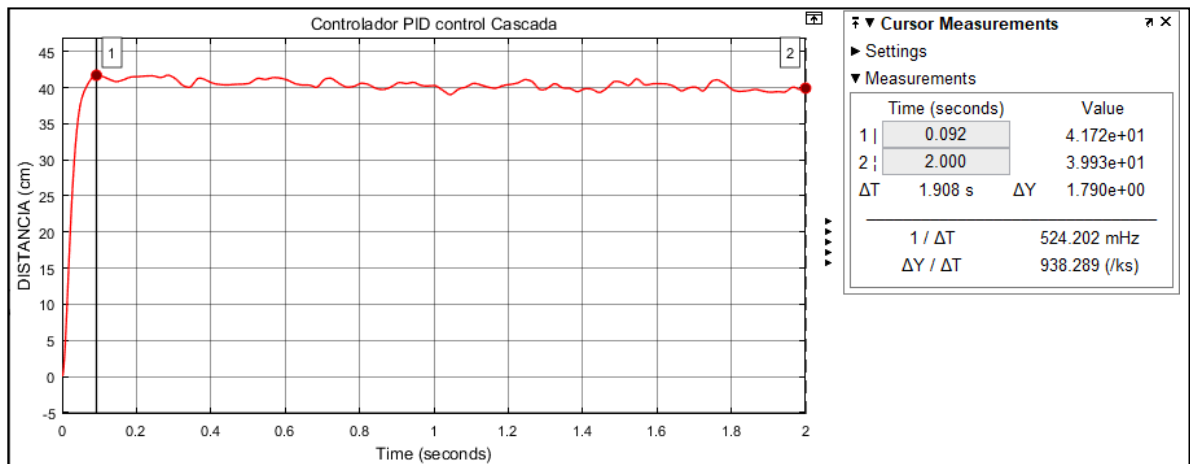


Figura 382 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 41.72 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20.86 cm

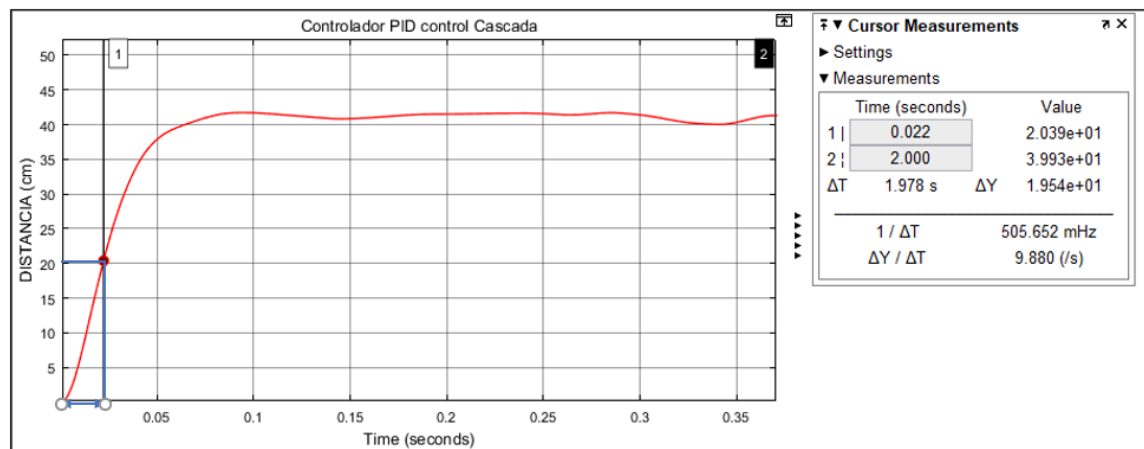


Figura 383 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.068 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 37.55cm

10% de VF= 4.172 cm

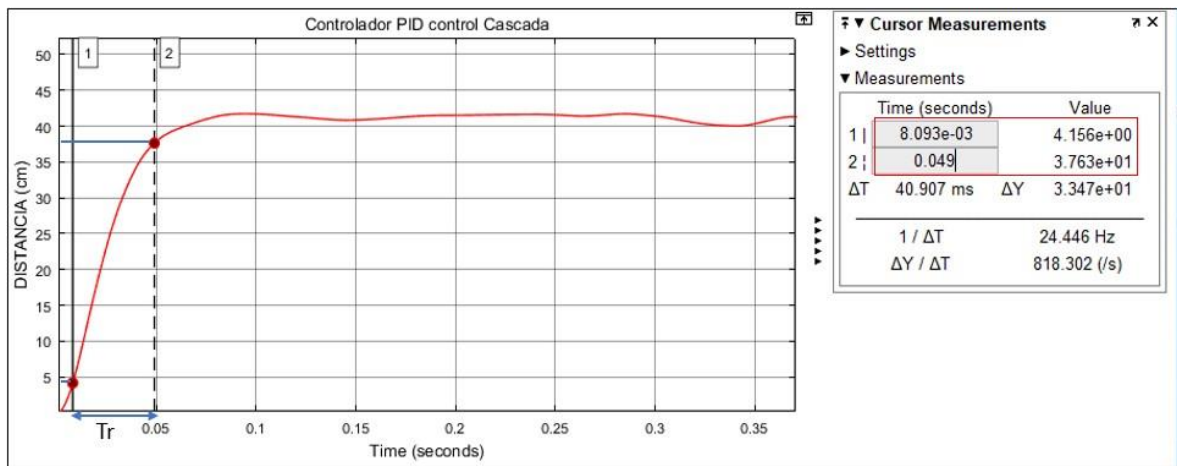


Figura 384 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.049 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.008 segundos

$Tr = 0.049 - 0.008 = 0.041$ segundos

➤ **Tp:**

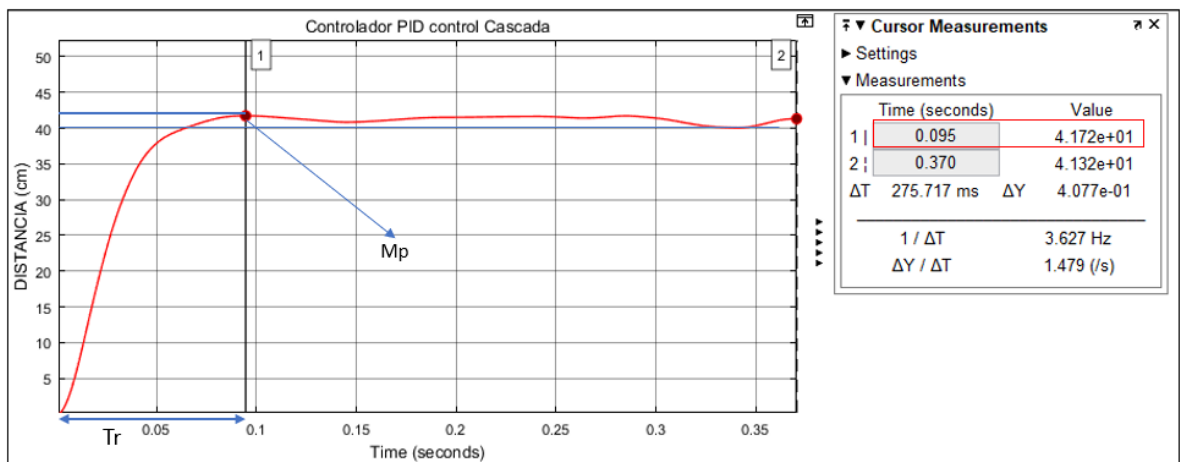


Figura 385 Tiempo para el primer pico máximo del sistema. Autoría propia

$Tp = 0.095$ segundos

➤ **Mp:**

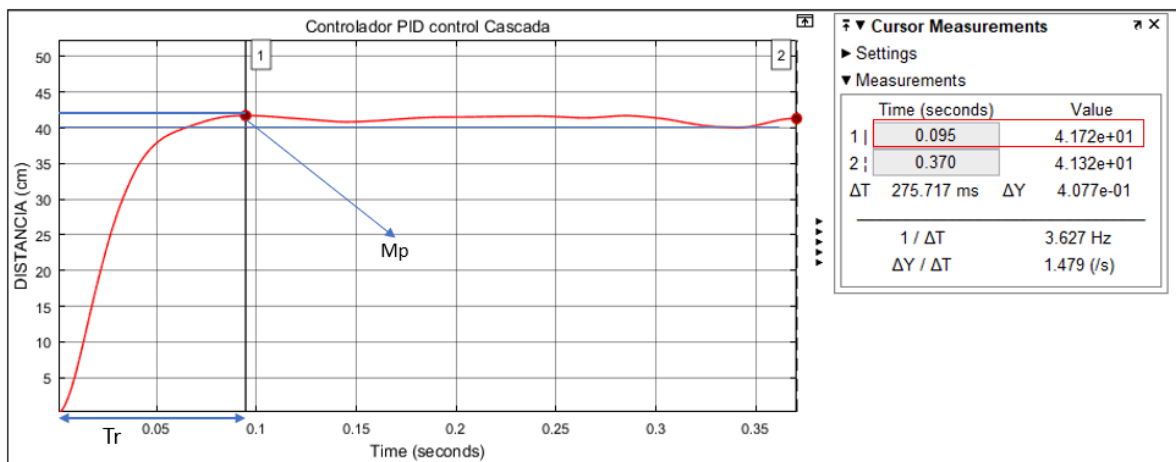


Figura 386 Mayor pico presentado en la salida del sistema. Autoría propia

$$M_p = 41.72 - 40 = 1.72 \text{ cm}$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.82$$

De esta manera el rango es 40.81 para el límite superior y 39.19 para el límite inferior.

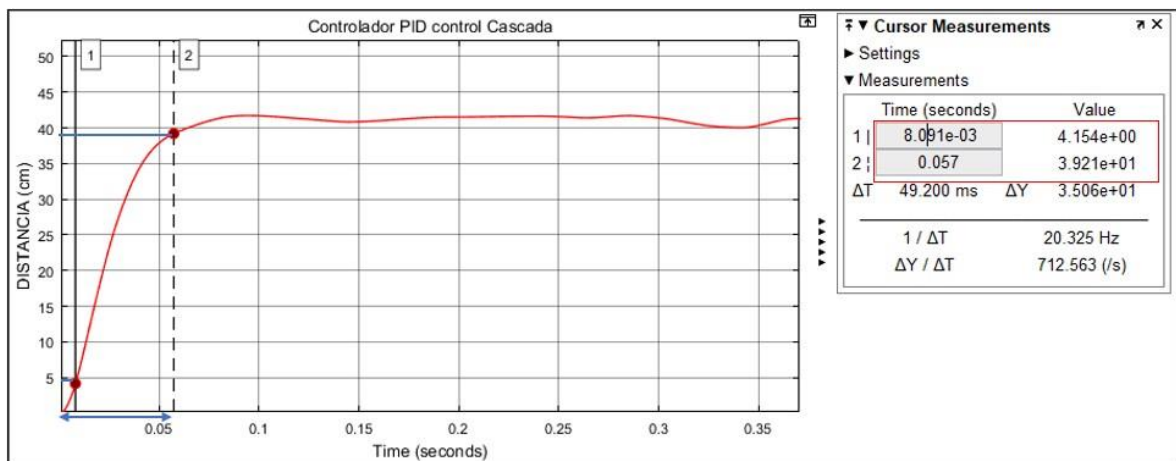


Figura 387 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.057 segundos

9.5.3.1.2. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método TUNING

- Ruido

En la figura 338 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 339 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

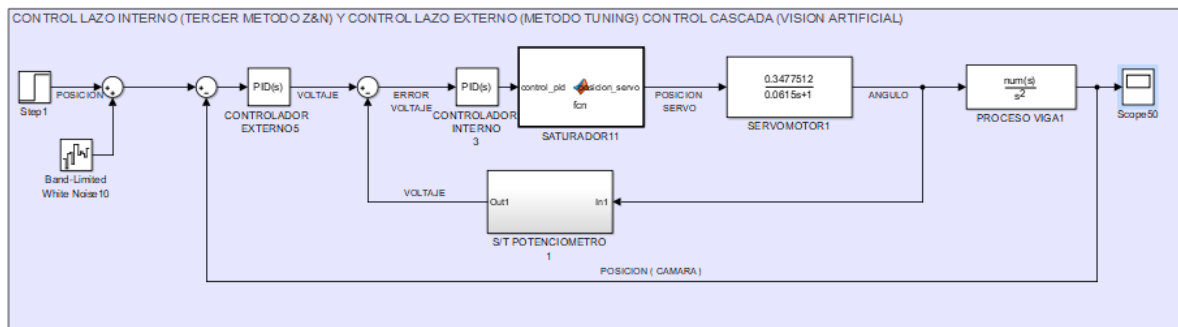


Figura 388 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

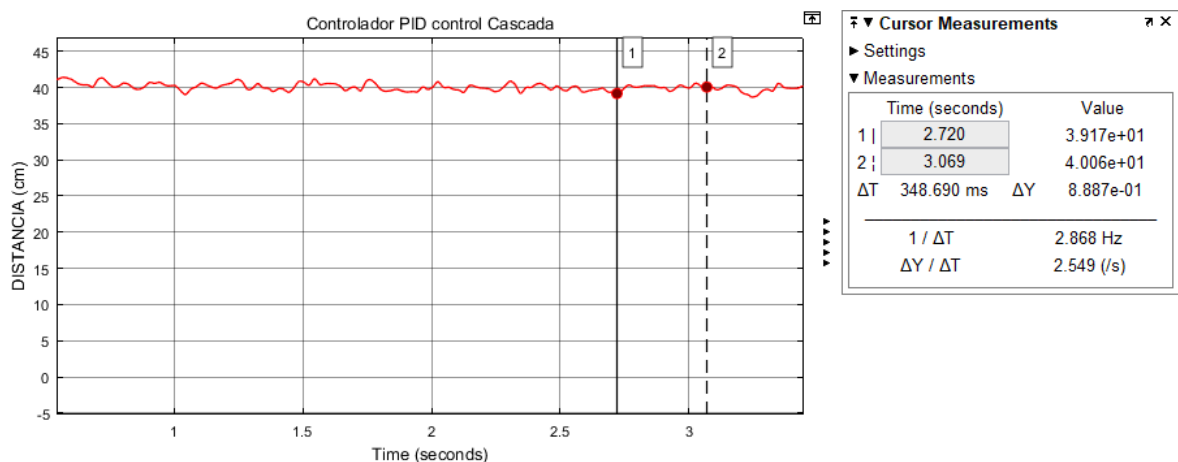


Figura 389 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 390 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 391 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

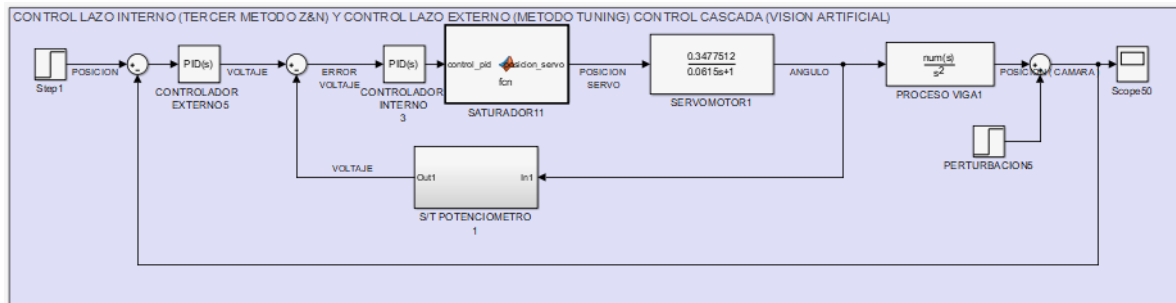


Figura 390 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 391 el controlador logra atenuar en un 100%

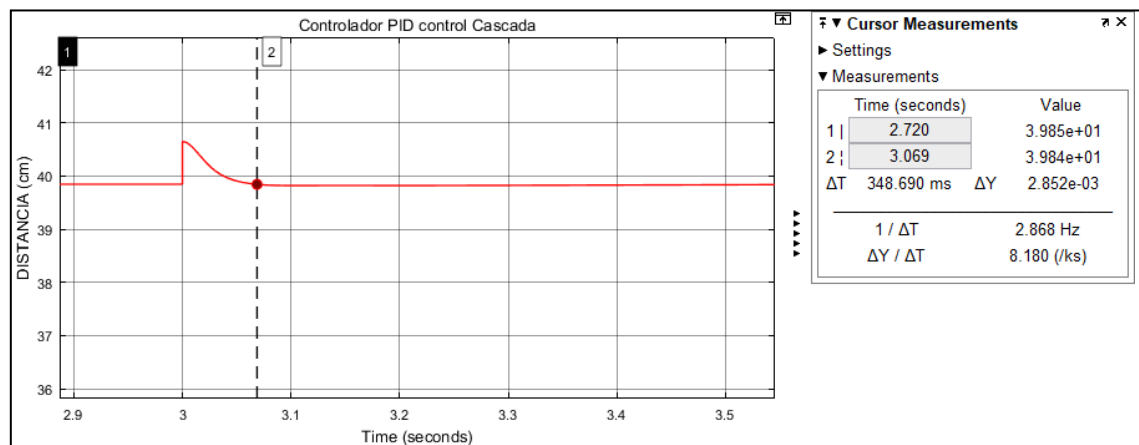


Figura 391 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.5.3.1.3. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID lazo interno por metodo de DAHLIN y lazo externo por método tuning

- Condiciones normales

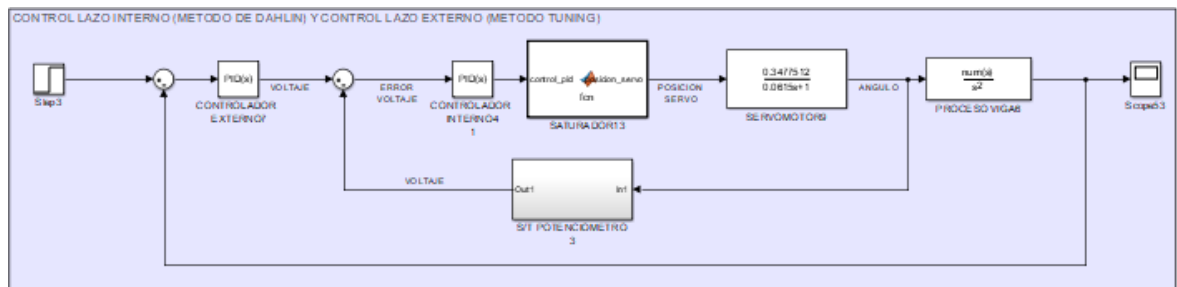


Figura 392 Diagrama de bloques controlador PID Cascada. Autoría propia

En la figura 393 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

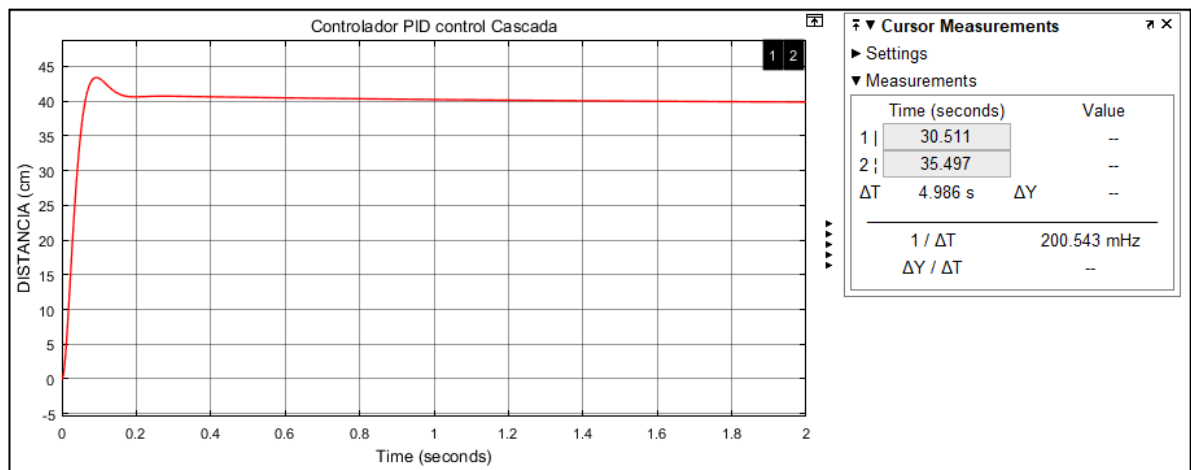


Figura 393 Controlador PID Control cascada. Autoría propia

Valor final (VF)= 40 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 20 cm

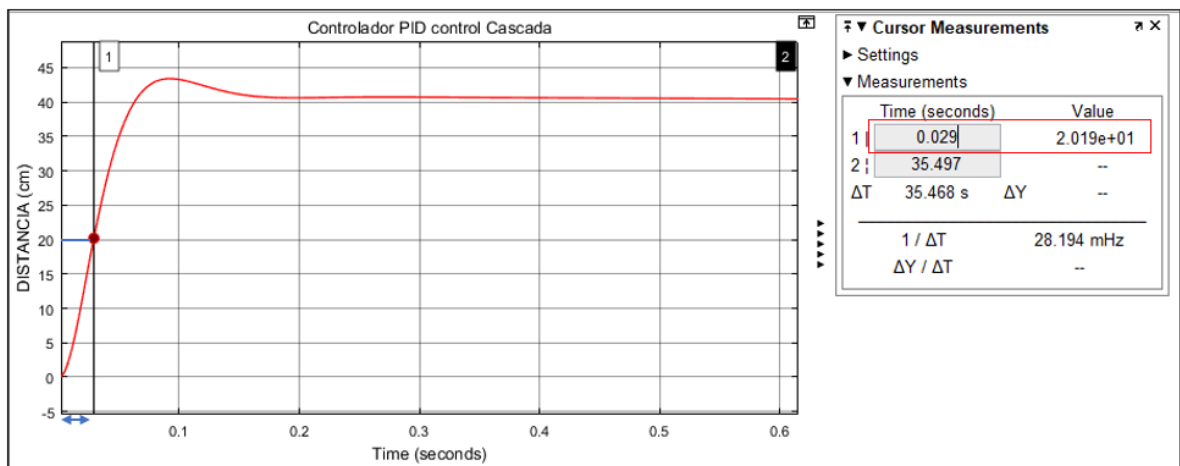


Figura 394 50% del punto de estabilización PID Control cascada. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.029 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 36 cm

10% de VF= 4 cm

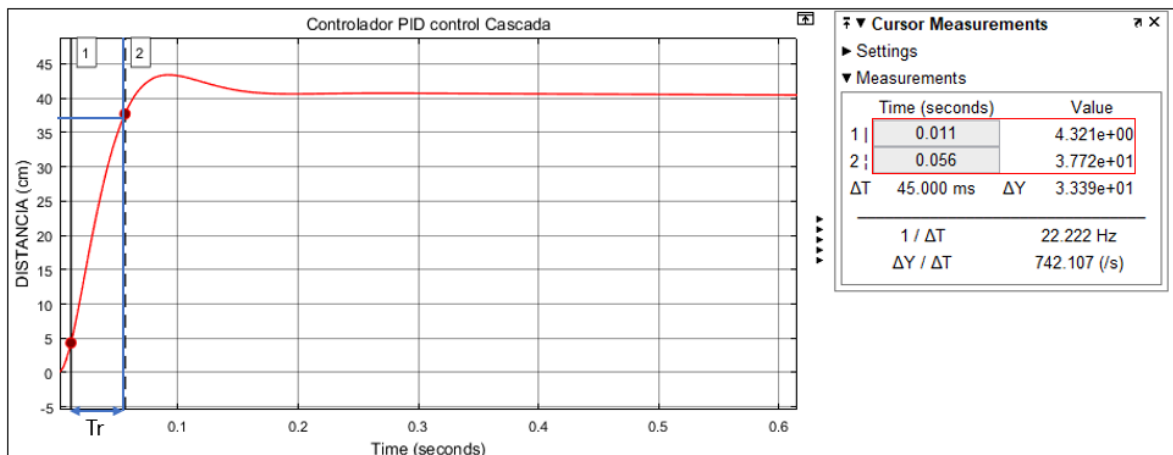


Figura 395 10% Y 90% del valor final de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.056 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.011segundos

$Tr = 0.056 - 0.011 = 0.045$ segundos

➤ **Tp:**

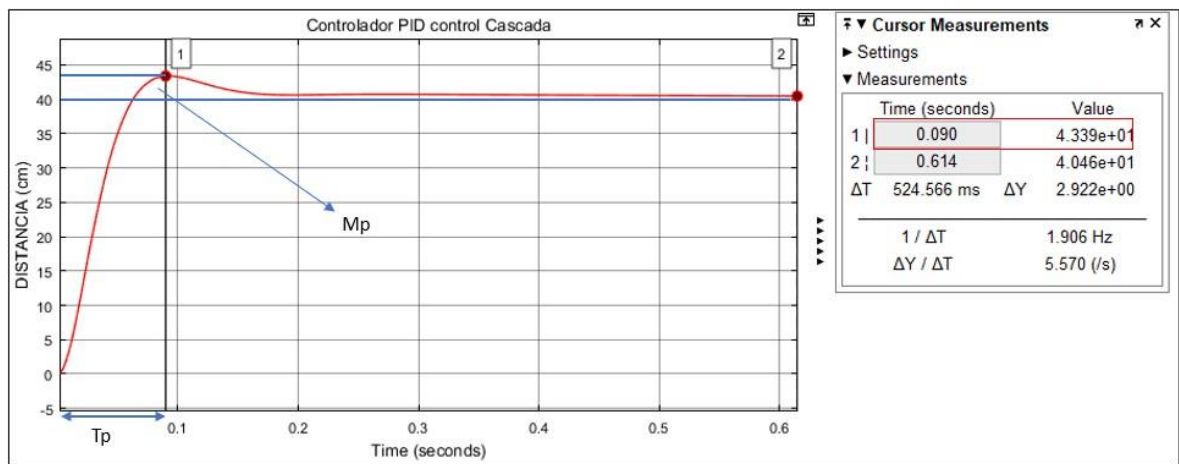


Figura 396 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.090$ segundos.

➤ **M_p :**

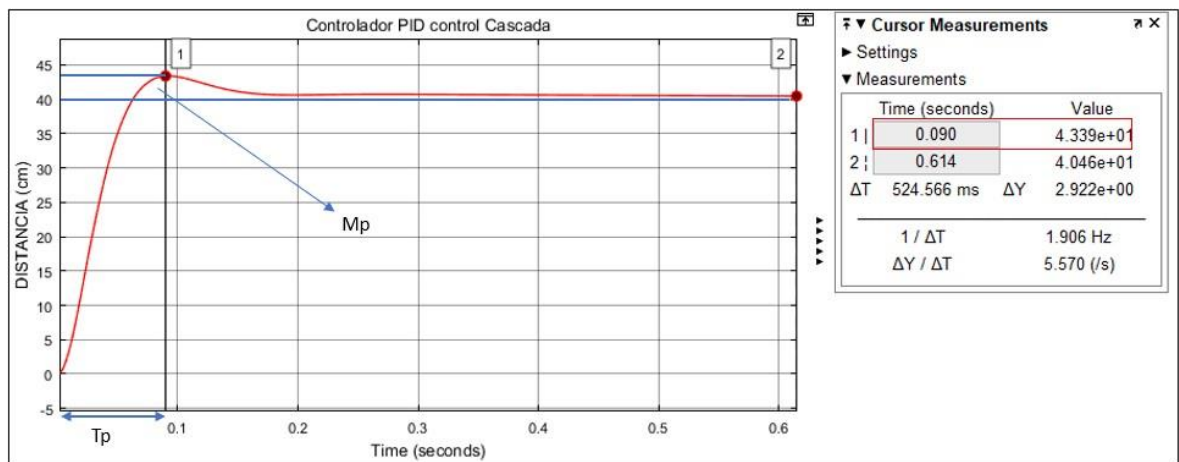


Figura 397 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 43.39 - 40 = 3.39 \text{ cm}$$

➤ **T_s :**

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.8 para el límite superior y 39.2 para el límite Inferior.

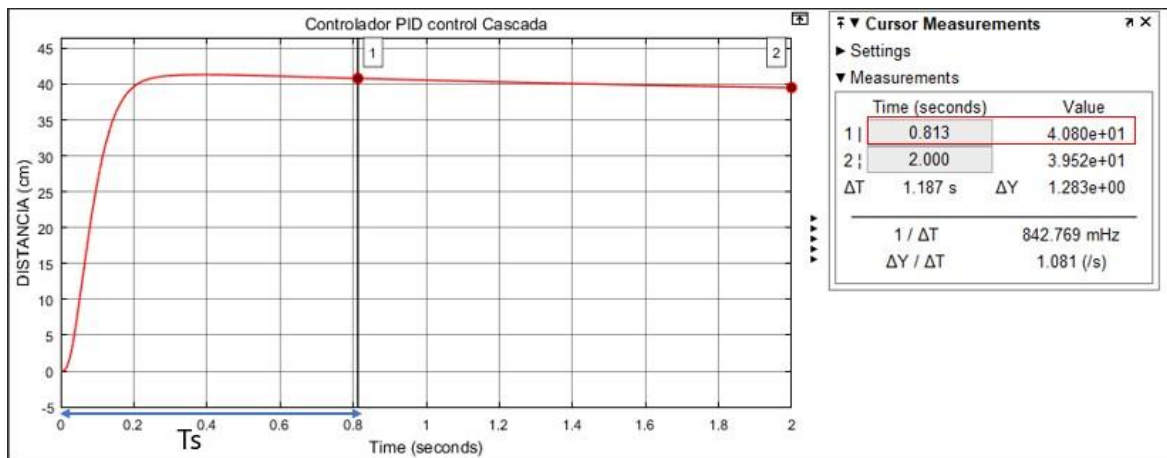


Figura 398 Tiempo de establecimiento. autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 0.813 segundos

- Ruido

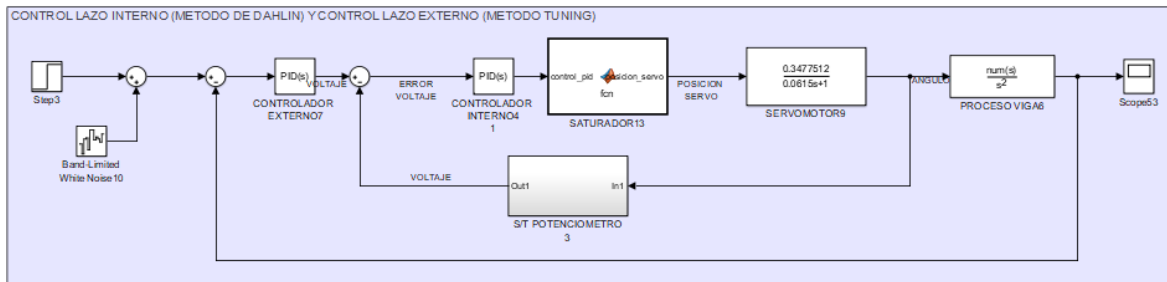


Figura 399 Diagrama de bloques control PID Cascada. Autoría propia

En la figura 400 se observa la respuesta general del sistema ante ruido de valor 0.02175

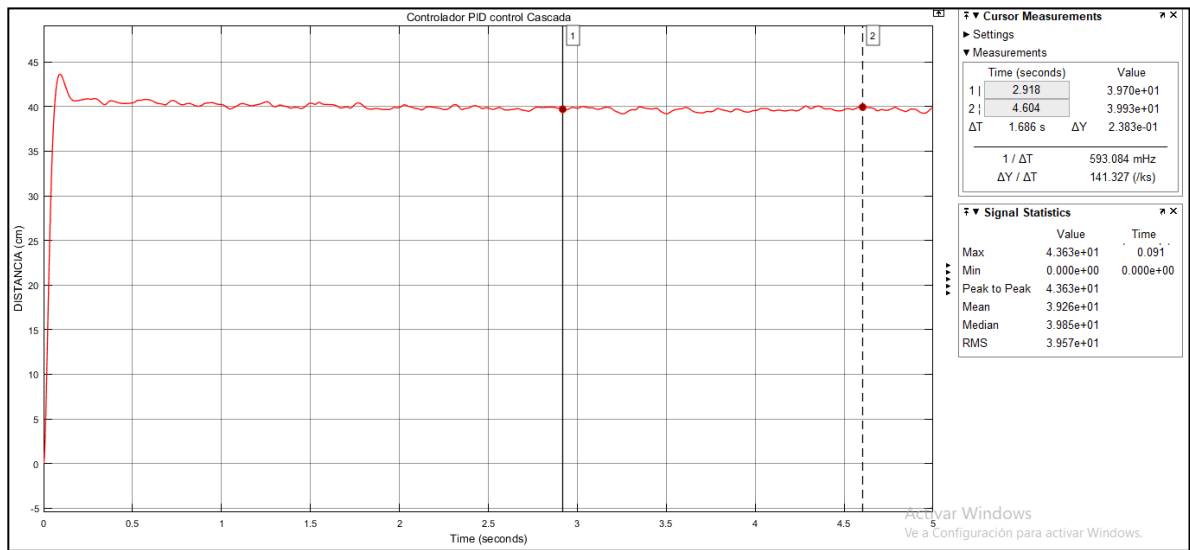


Figura 400 Respuesta controlador PID Cascada frente a ruido. Autoría propia

Valor final (VF)= 39.7 cm

➤ **Td:**

50% de VF= 19.85 cm

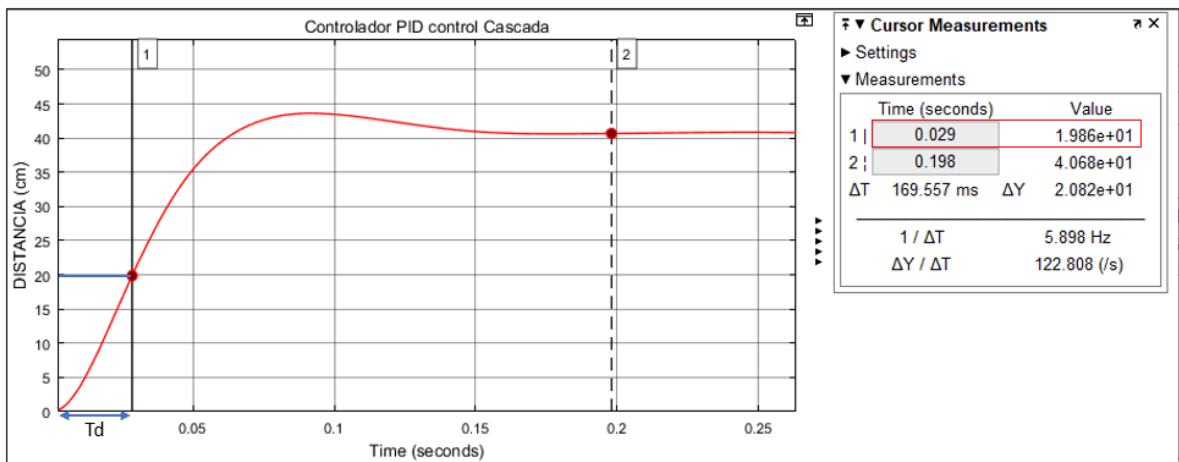


Figura 401 Tiempo de respuesta del controlador a 50% del valor de estabilización. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = 0.029 segundos

➤ **Tr:**

90% de VF= 35.73 cm

10% de VF= 3.99 cm

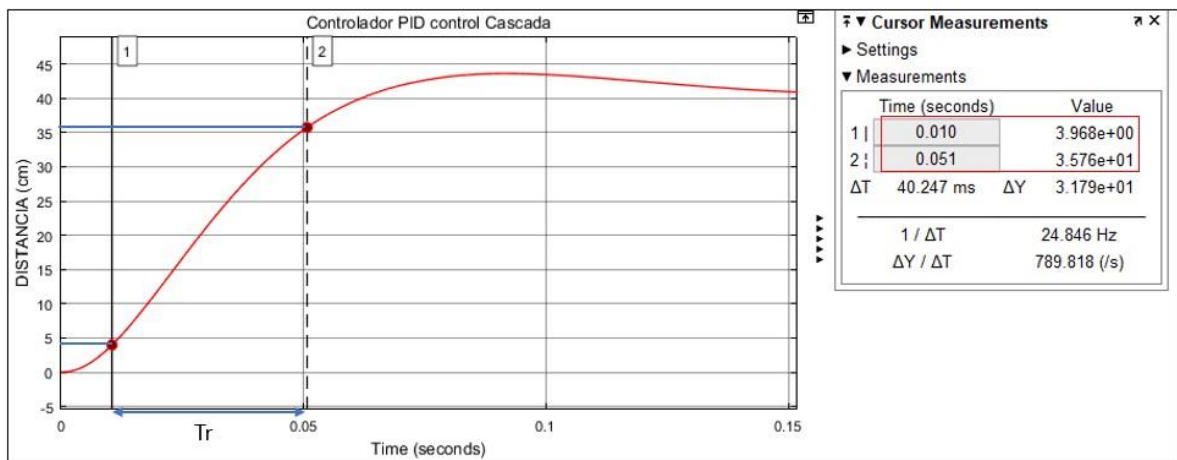


Figura 402 10% Y 90% del valor final de estabilización con ruido. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 0.051 segundos

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0.010 segundos

$T_r = 0.051 - 0.010 = 0.041$ segundos

➤ **Tp:**

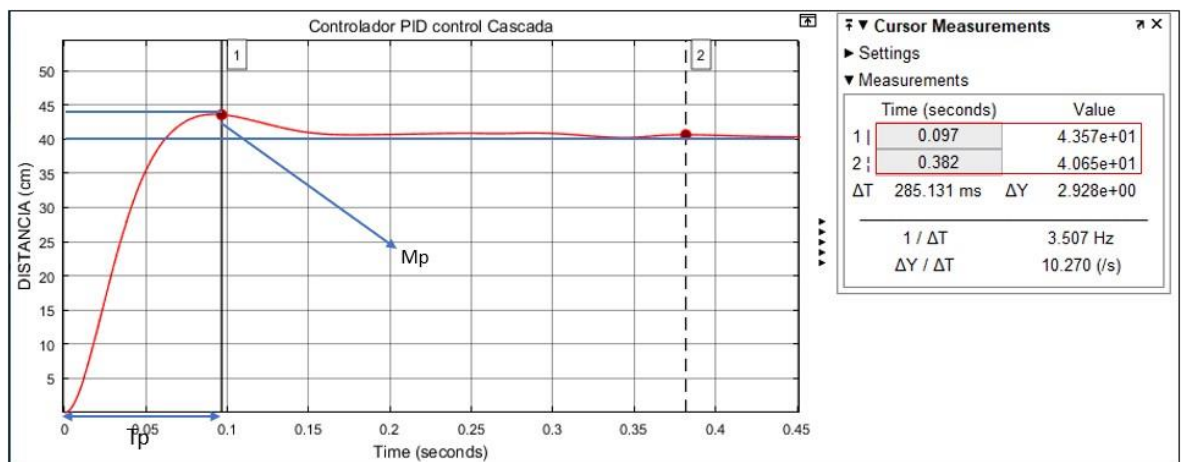


Figura 403 Tiempo pico respuesta controlador PID Cascada. Autoría propia

$T_p = 0.097$ segundos

➤ **Mp:**

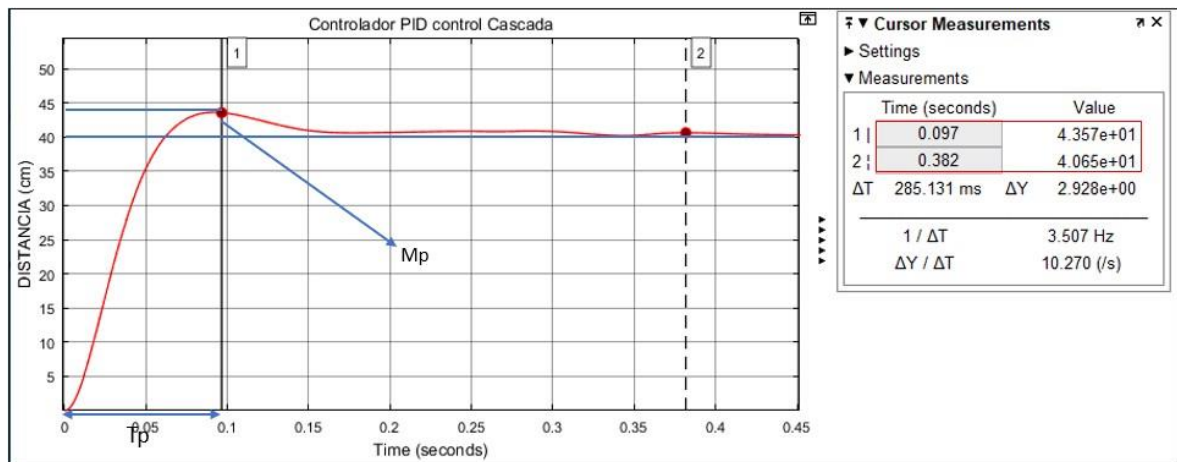


Figura 404 Valor pico máximo control PID Cascada. Autoría propia

$$M_p = 43.57 - 39.7 = 3.87 \text{ cm}$$

➤ **Ts:**

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

$$2\% \text{ de VF} = 0.8$$

De esta manera el rango es 40.5 para el límite superior y 38.9 para el límite Inferior.

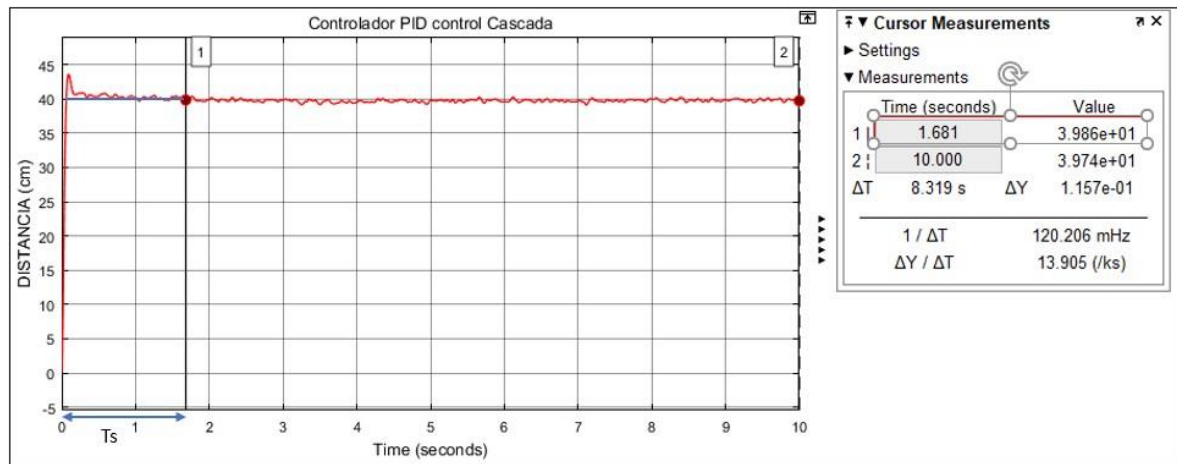


Figura 405 Controlador PID Cascada con ruido al 98%. Autoría propia

Valor en el dominio del tiempo del 2% (VF) = 1.681 segundos

9.5.3.1.4. Estudio del régimen estable del sistema de control PID lazo interno por tercer método de Z&N y lazo externo por método Tuning

- Ruido

En la figura 406 se observa el diagrama de bloques del sistema ante ruido y en la figura 407 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante ruido de valor 0.02175

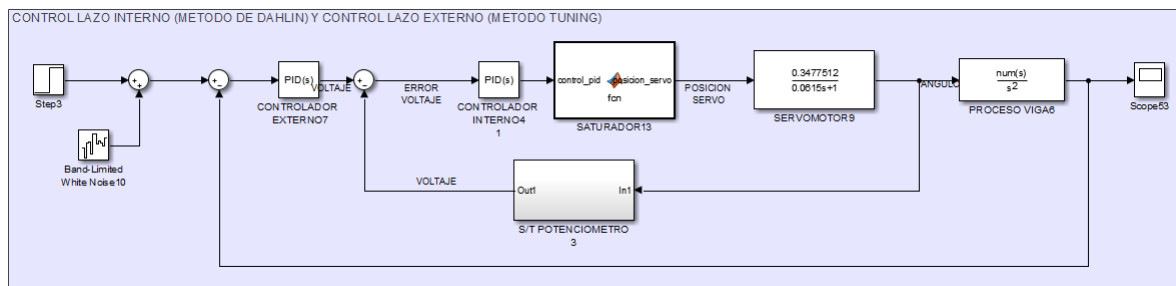


Figura 406 Diagrama de bloques control PID Cascada con ruido. Autoría propia

Se somete el sistema a un setpoint de 40 dando como salida la siguiente grafica

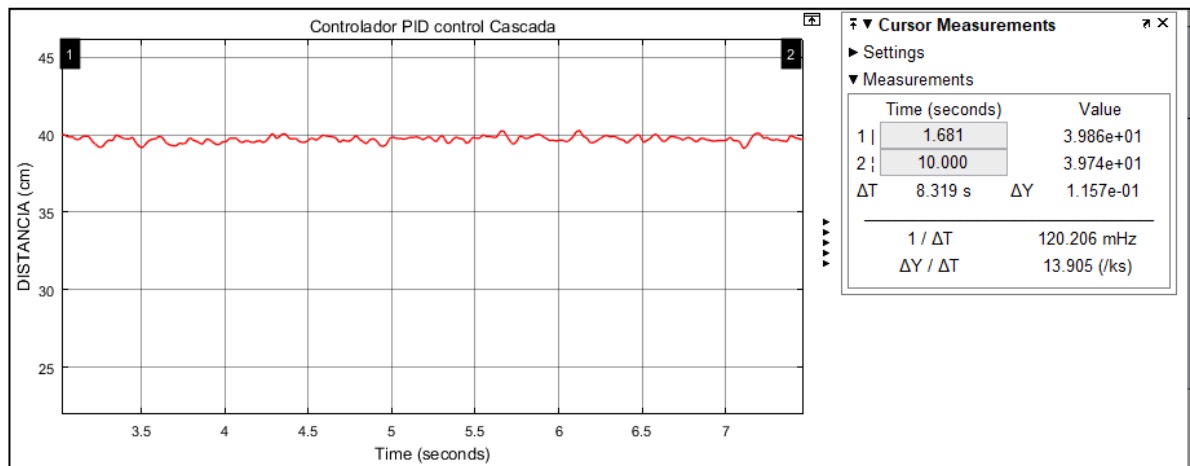


Figura 407 Respuesta transitoria controlador Cascada con ruido. autoría propia

Como se puede observar la respuesta que se obtiene logra llegar al setpoint indicado por tal motivo se puede decir que el control PID Cascada es efectivo al momento de someter el sistema a ruido del 0.05% del valor final.

- Perturbación

En la figura 408 se observa el diagrama de bloques del sistema ante perturbación y en la figura 409 se observa la respuesta en el régimen estable del sistema ante perturbación (en el instante de tiempo 10 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.87 cm en promedio y en el instante de tiempo 17 es retirada del sistema).

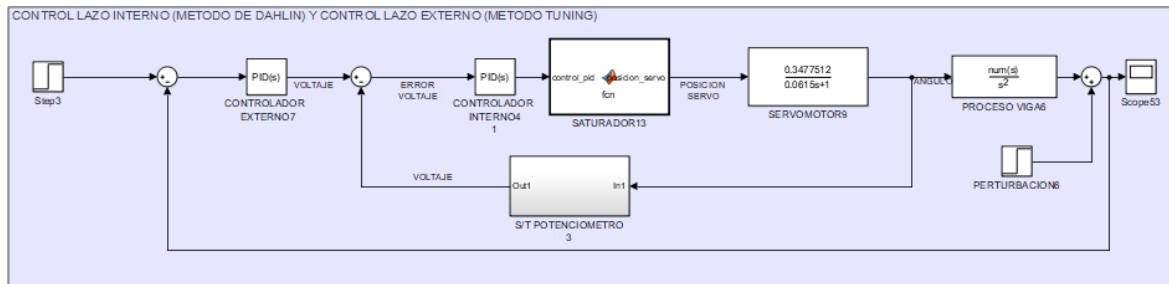


Figura 408 diagrama de bloques control PID Cascada con perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 409 el controlador logra atenuar en un 100% la perturbación en un tiempo corto.

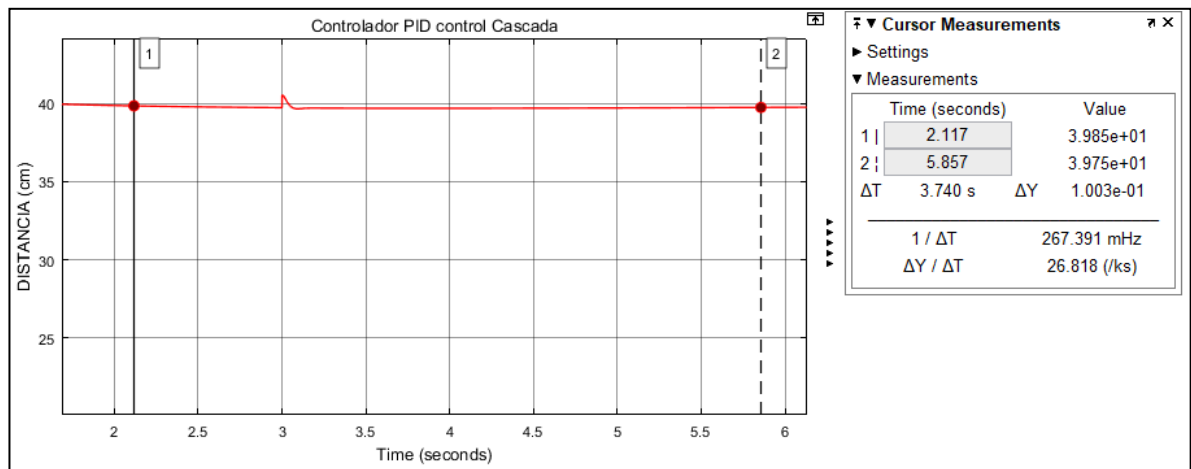


Figura 409 Respuesta etapa estable control PID Cascada sometido a perturbación. Autoría propia

9.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS VISIÓN ARTIFICIAL

Después de llevar a cabo la implementación de los diferentes controladores clásico y controladores cascada para visión artificial se lleva a cabo la comparación de los resultados obtenidos, teniendo el mejor controlado PID clásico y PID Control cascada.

9.6.1. Controlador PID clásico

Tabla 37 valores controladores clásicos. Autoría propia

CONTROLADORES CLASICOS								
CONTROL		REGIMEN TRANSITORIO					REGIMEN ESTABLE	
		Td (s)	Tr (s)	Tp (s)	Mp (cm)	Ts (s)	V. ACENTAMIENTO cm	% DE ERROR
2° Z& N	Normal	1,65	4,748	N/P	N/P	5,787	40	0
	Ruido	1,803	4,922	N/P	N/P	5,177	37,6	0,06
PD TUNING	Normal	0,974	2,026	N/P	N/P	3,85	40	0
	Ruido	1,052	2,291	N/P	N/P	5,123	39,17	0,03
PID TUNING	Normal	0,817	1,013	3,243	7,63	9,679	40	0
	Ruido	1,379	1	2,978	7,84	12,4	39,8	0,01

Como se puede observar en la tabla 37 en condiciones normales el controlador PID TUNING ofrecen los mejores criterios tanto en etapa transitoria como en etapa estable, aunque este presenta un sobre impulso del 18 % sometido a ruido, se observa tanto en etapa transitoria como etapa estable logra tener estabilización en el setpoint indicado

Para validar los resultados se graficará la salida de estos 3 modelos sometidos a un escalón de 40 en condiciones normales.

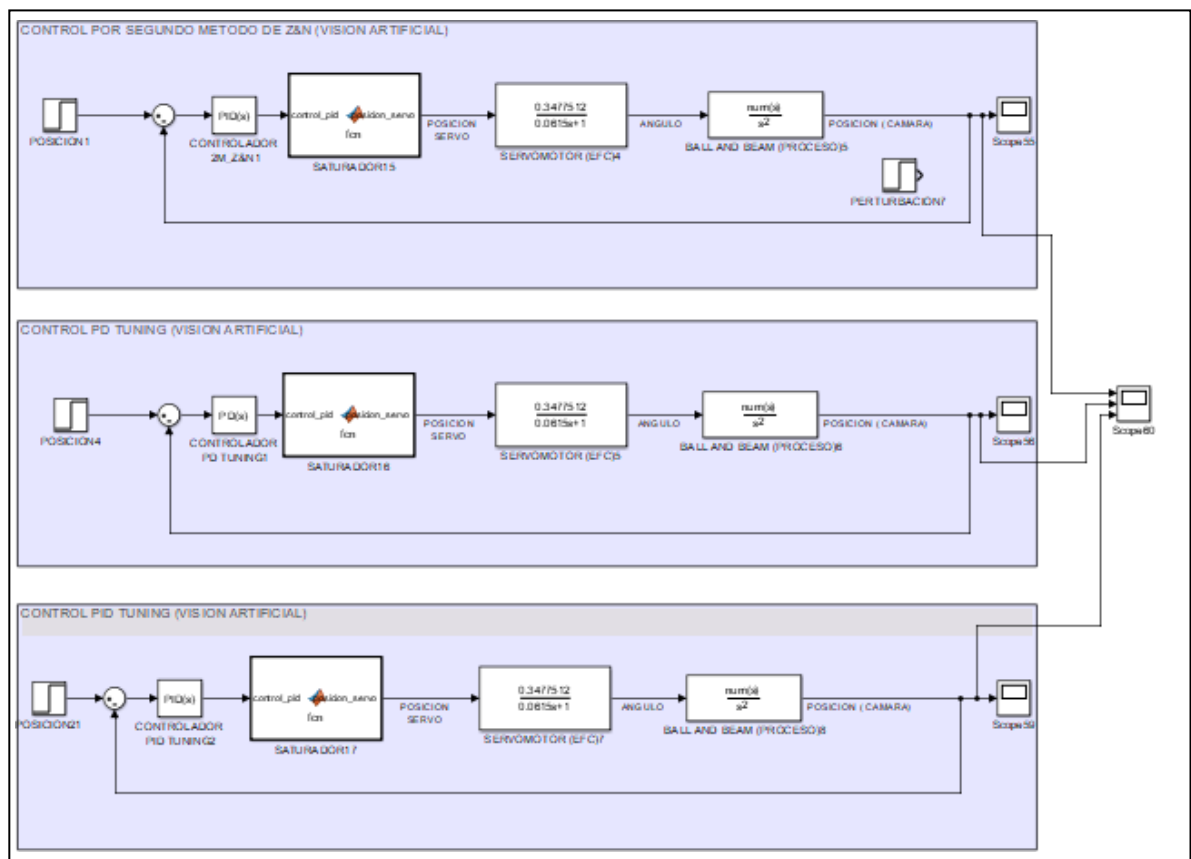


Figura 410 Diagrama de bloques controladores clásicos. Autoría propia

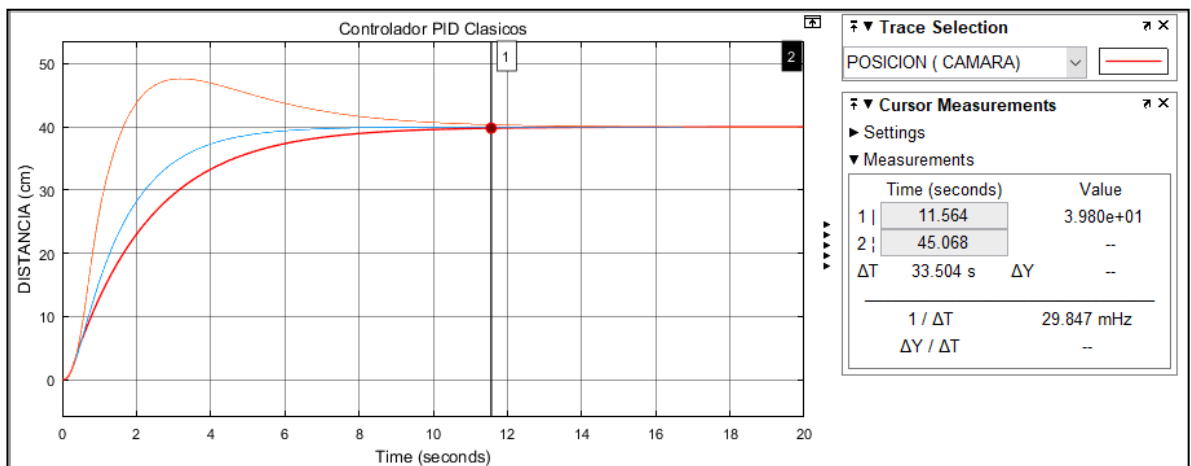


Figura 411 respuesta controladores clásicos. Autoría propia

Se someten los controladores a ruido para verificar cual ofrece mayor fiabilidad

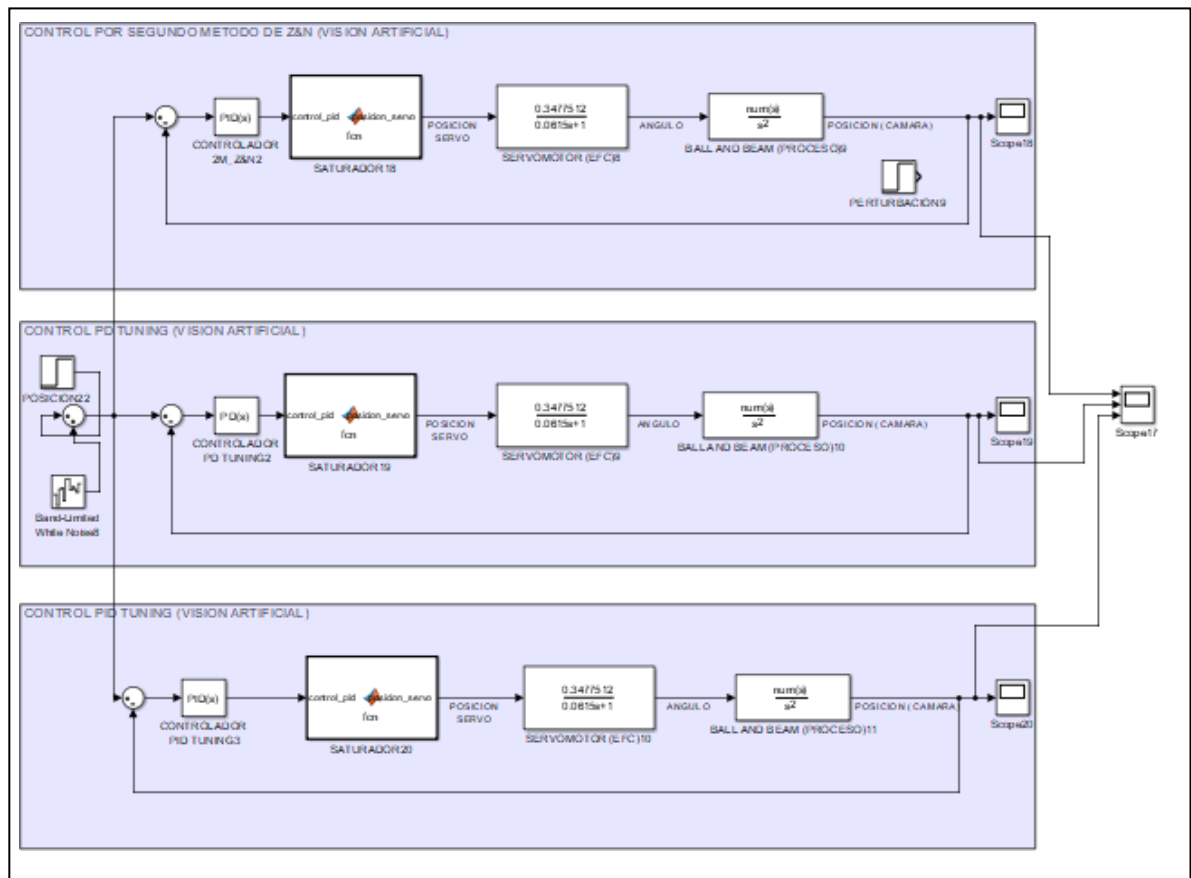


Figura 412 Diagrama de bloques controladores clásicos con ruido. Autoría propia

Se obtuvo la respuesta mostrada en la figura 413.

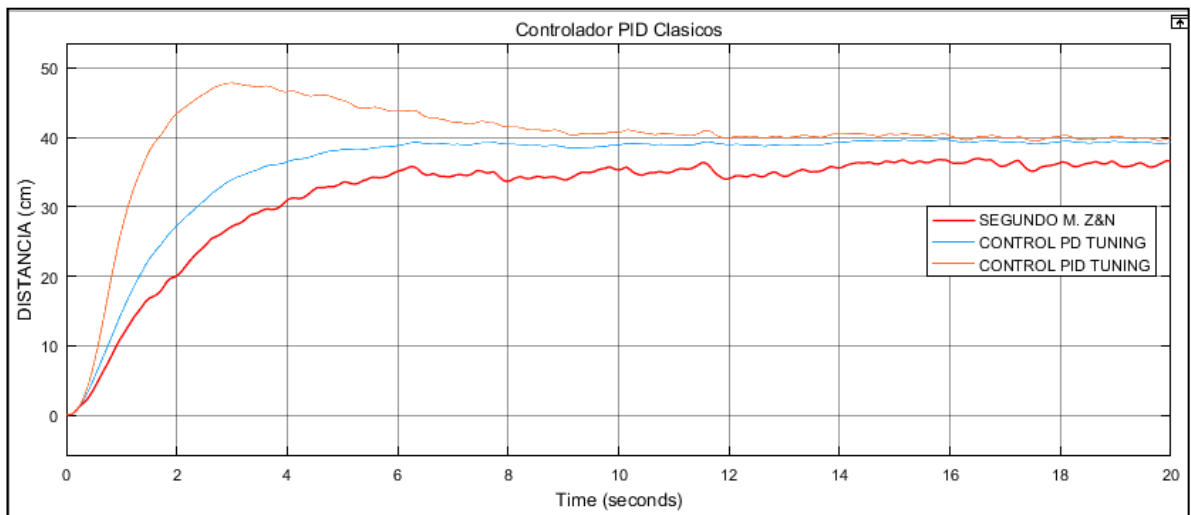


Figura 413 respuesta controladores clásicos con ruido. Autoría propia

Como se puede apreciar en la figura 413 el controlador pid por tuning es el que ofrece estabilidad en el setpoint indicado logrando mitigar la acción de ruido presente en el sistema, aunque presenta un sobre impulso del 18% del valor de estabilización.

9.6.2. Controlador clásico en cascada

Tabla 38 valores controladores clásicos en Cascada. Autoría propia

CONTROLADORES CLASICOS EN CASCADA								
CONTROL		REGIMEN TRANSITORIO				REGIMEN ESTABLE		
		Td (s)	Tr (s)	Tp (s)	Mp (cm)	Ts (s)	V. ACENTAMIENTO cm	% DE ERROR
L1 2° Z&N - L2 TUNING	Normal	0,068	0,039	0,11	1,29	0,061	41,5	0,03
	Ruido	0,078	0,041	0,095	1,72	1,25	40,95	0,02
L1 DAHLIN - L2 TUNING	Normal	0,029	0,045	0,09	3,39	0,813	40	0
	Ruido	0,029	0,041	0,097	4,23	1,681	39,7	0,01

Como se puede observar en la tabla 38 en condiciones normales el controlador en el lazo interno por el 2° método de Z&N y lazo externo método TUNING en condiciones normales y frente a ruido presenta sobre impulso, pero este se encuentra menor al 5% y el controlador lazo interno metodo DAHLIN, lazo externo metodo TUNING presenta menores tiempos en estado transitorio y presenta estabilización al setpoint indicado con margen del 2%.

Para validar los resultados se graficará la salida de estos 2 modelos sometidos a un escalón de 40 en condiciones normales obteniendo la siguiente respuesta

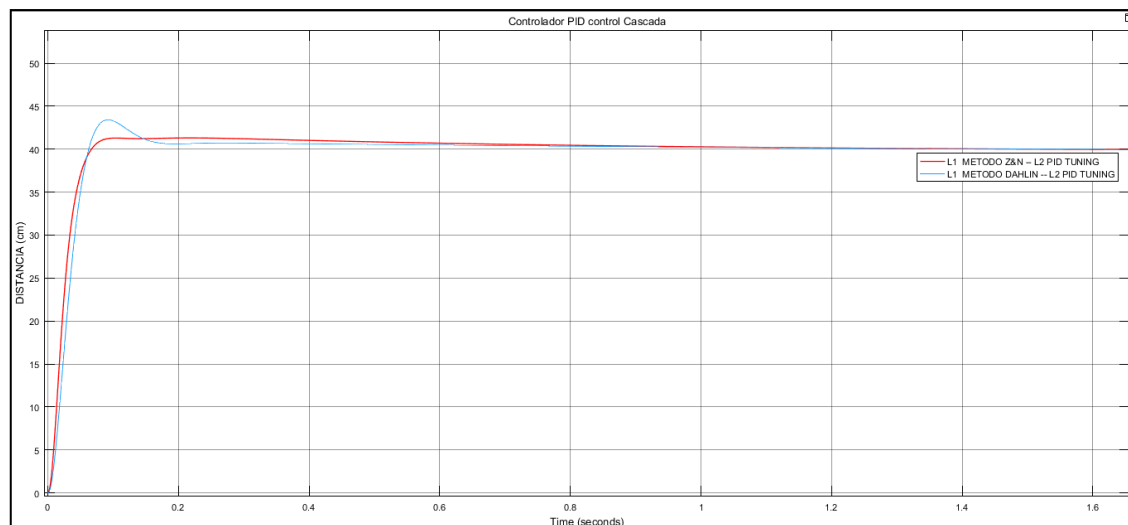


Figura 414 Respuesta controladores en cascada condiciones normales. Autoría propia

Como se puede observar los dos controladores presentan sobre impulso, pero el controlador por el metodo de Z&N Y PID TUNING tiene un sobre impulso en el rango del 5% y presenta un mejor tiempo de estabilización.

Respuesta controladores clásicos en cascada sometidos a ruido

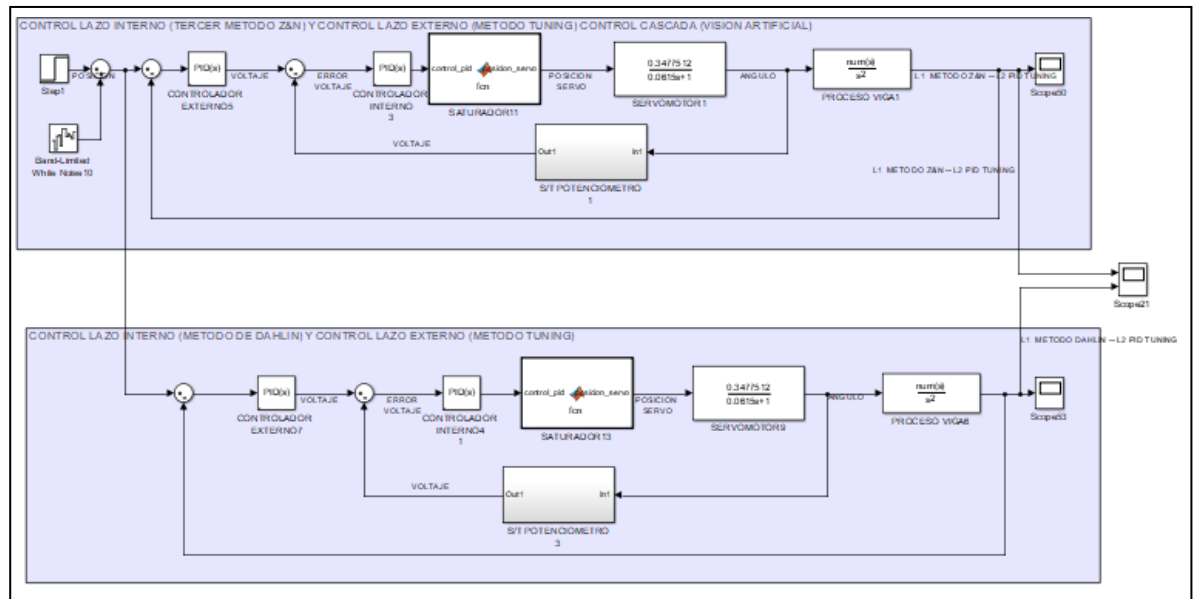


Figura 415 Controladores Cascada sometidos a ruido. Autoría propia

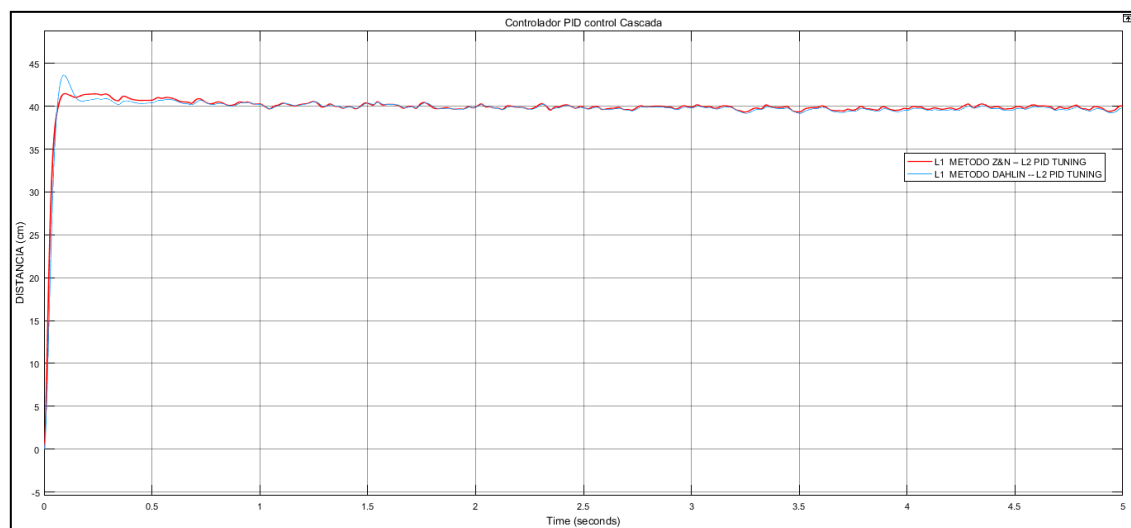


Figura 416 Respuesta controladores en cascada. Autoría propia

Como se puede observar en la figura anterior los dos controladores presentan sobre impulso, pero el más eficaz es el compuesto por el método de Z&N lazo interno y lazo externo método TUNING .

10.INGRESO DE VALOR DESEADO EN LA PLANTA REAL

Como es sabido en la planta hay que ingresar una consigna (set point) para que el sistema responda junto con el controlador ante esta referencia de entrada, para tener una respuesta deseable; teniendo claro esto, para el ingreso del valor deseado se va a realizar de dos formas:

- Se hará el ingreso del valor deseado de forma digital, mediante una interface humano-maquina.



Figura 417 Valor deseado de forma digital

- La otra manera de ingresar el valor es de forma manual, mediante la implementación de un riel, en el cual se desplaza un componente que se le llamara “bandera”. La distancia de este componente será medida por un sensor ultrasónico HC-SR04, dando como lectura el “valor deseado”.



Figura 418 Valor deseado de forma manual

11. CONTROL DE LA PLANTA REAL CON SENSOR ULTRASONICO

11.1. LINEALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL SENSOR ULTRASÓNICO

Es debido saber que distintos componentes de la planta como la fuente, servomotor, entre otros pueden producir una señal parasitaria (ruido eléctrico), la cual produce interferencia en la señal de medición de los sensores (principalmente analógicos), dando como resultado medidas dispersas, por lo tanto, para mitigar esta interferencia eléctrica se opta por usar un filtro por software promediando la señal de medición.

```
int ADC0_promedio(int n) /// FILTRO DISTANCIA
{
    long suma=0;
    for(int p=0;p<n;p++)
    {
        suma=suma+analogRead(outPin);
    }
    return (suma/n)-103;
}
```

Figura 419 Código de Filtro promedio. Autoría propia

Una vez que se ha solucionado el problema del ruido, se puede pasar a la caracterización de la medición propia del sensor. Para ello, se ha colocado una cinta métrica en un costado de la barra, y se ha movido el carro de centímetro en centímetro a lo largo de esta, y los valores medidos se iban anotando en una tabla, con el fin de conocer el valor correcto de la distancia del carro.

Realizado lo anterior se usa un método que se conoce como “lookuptable”, el cual consiste en guardar en el programa de Arduino una matriz con las componentes de la medición, y tras realizar la lectura, ver entre qué dos valores se encuentran para dar como medida real el resultado de la interpolación lineal entre ambos, tal y como se detalla en el trozo de código que se adjunta a continuación.

```

distancia_total= ((centena*100)+(decena*10)+unidad)*0.1;

float A[2][44] = {{ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16,
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
37, 38, 39, 40, 41, 42, 43},
{ 0, 1.6, 2.9, 3.6, 4.7, 6.5, 7.3, 7.9, 8.7, 9.8, 10.5, 11.7, 13.4, 14.6, 15.3,16.5, 17.2,
17.9, 19.3, 20.3, 21.5, 22.8, 24.0, 24.8, 25.9, 26.6, 27.3, 28.5, 29.7,30.2, 31.4, 32.8,
33.5, 34.8, 35.5, 35.7, 37.3, 38.5, 38.8, 40.0, 41.5, 42.4, 43.0, 44.7}};

for(nn=0;nn<43;nn++){
  if(distancia_total>=A[1][nn] && distancia_total<=A[1][nn+1]){
    distancia_total_1=A[0][nn]+((A[0][nn+1]-A[0][nn])/(A[1][nn+1]-A[1][nn]))*(distancia_total-A[1][nn]);
  }
}

```

Figura 420 Trozo de código método "lookuptable". Autoría propia

11.2. CONTROL PID DE LA PLANTA REAL

Como se indicó en los Ítems relativos a las Simulaciones, el sistema "Ball and beam" no puede ser controlado simplemente con un controlador proporcional, ya que, debido a su doble integrador en el proceso, la salida en bucle abierto sería la de un sistema críticamente estable. En consecuencia, la primera propuesta que se hace para controlar la planta real es un controlador PID clásico.

Para llevar a cabo este controlador se usa el software de Arduino, en donde se hace un programa que realizara dos tareas. Por un lado, el cálculo de la acción de control y su paso al servomotor para que actúe consecuentemente y por el otro, la lectura de la referencia.

En términos generales, el bucle que se repite continuamente en el Arduino tiene la estructura que se encuentra en el siguiente diagrama de flujo (código [Anexo 2](#)).

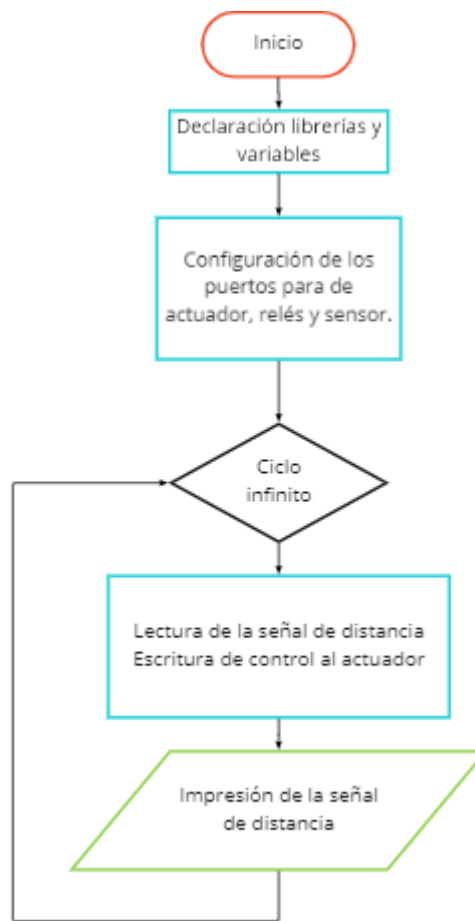


Figura 421 Diagrama de flujo de código de controlador PID con medición de sensor ultrasónico. Autoría propia

Una vez se tiene el programa que implementa el control, se puede pasar al diseño de los parámetros del controlador PID. Para ello, si bien se utilizarán como partida los resultados obtenidos en las simulaciones de los ítems anteriores, se diseñarán siguiendo un método heurístico en el que se elegirá en primer lugar una ganancia del controlador que sea lo suficientemente grande para activar el sistema pero sin que provoque sobre oscilaciones demasiado elevadas y después se modificará el término derivativo para que el transitorio mejore y para que aumente la velocidad de respuesta, y por último se modificara el termino integrativo para mejorar el error en el estado estable y así el sistema pase de ser críticamente estable a simplemente estable.

Por lo tanto se desarrolló la tabla 39:

Tabla 39 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico con medición por sensor ultrasónico. Autoría propia

MÉTODO HEURÍSTICO				
	Kp	Ki	Kd	Resultado
Valores iniciales	0	0	0	-
Ajuste 1	1	-	-	Malo
Ajuste 2	5	-	-	Regular
Ajuste 3	12	-	-	Malo
Ajuste 4	8	-	-	Bueno
Ajuste 5	-	-	100	Malo
Ajuste 6	-	-	3500	Regular
Ajuste 7	-	-	8000	Bueno
Ajuste 8	-	0,1	-	Malo
Ajuste 9	-	0,9	-	Malo
Ajuste 10	-	0,5	-	Bueno
Valores finales	8	0,5	8000	PID

Siguiendo esta estrategia se llega a la conclusión de que la mejor combinación de parámetros obtenida ha sido $K_p = 8$, $K_i = 0.5$ y $K_d = 8000$. Para poder observar los resultados de este controlador, se debe ejecutar el programa de Arduino para que se cargue en la placa, como resultado con un set point de 18 cm se obtiene la figura 422:

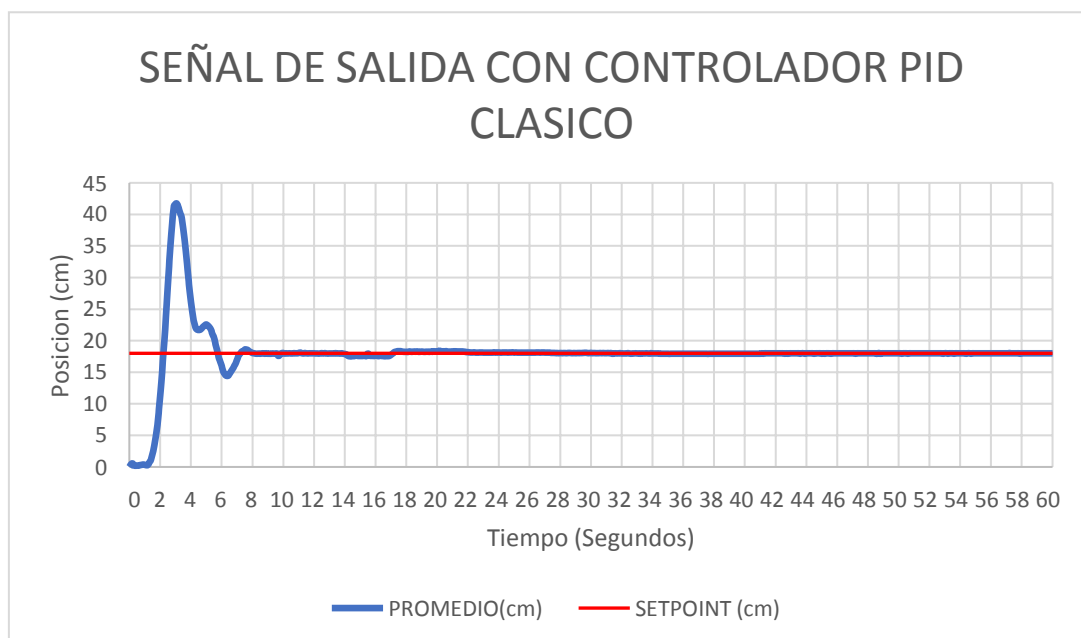


Figura 422 Respuesta del sistema con controlador PID. Autoría propia

11.3. CONTROL PID EN CASCADA DE LA PLANTA REAL

Con el objetivo de poder tener una realimentación del valor real del ángulo que forman la manivela respecto con el punto de partida del Smart servo (un valor de cero) en cada instante de muestreo, se hará uso de un sensor de ángulo. Con esta medición, se formará, junto con el control PID implementado en el apartado anterior, lo que se conoce como un control en cascada.



Figura 423 Posición angular de la manivela. Autoría propia

En cuanto a la implementación en código de este controlador, la estructura a seguir es muy parecida a la que se usó para el control PID. La diferencia recae en el hecho de que ahora son tres las tareas a llevar a cabo por lo que el reparto del tiempo en el ejecutivo cíclico se complica. En este caso, la tarea más rápida y que, por tanto, deberá realizarse en cada instante de muestreo es el control secundario, es decir, la lectura del ángulo, y así obtener la acción de control y enviarla al actuador.

En el siguiente diagrama de flujo (código [Anexo 3](#)) se puede observar cómo es el planteamiento del código para el control PID en cascada.

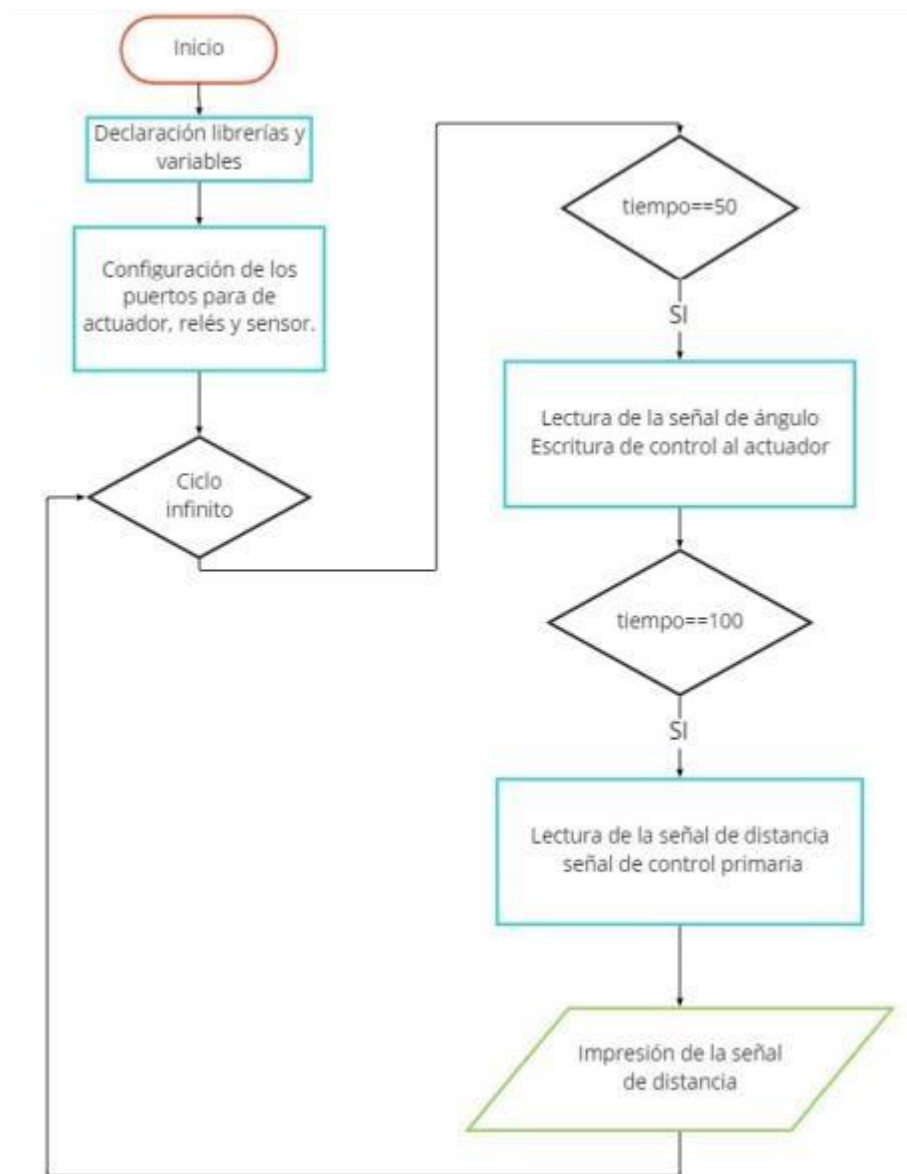


Figura 424 Diagrama de flujo de código de controlador PID en cascada. Autoría propia

Tras esto, se deberá realizar el control primario, que consiste en calcular el valor de la posición tal y como se hizo en el apartado anterior. Esta tarea se realizará dos veces más lenta que el control secundario, es decir, cada vez que el contador sea múltiplo de dos.

Se pasa a continuación al diseño de los parámetros de ambos controladores. Como se sabe que el controlador primario ya ha funcionado en el apartado anterior, se parte de estos valores para calcular los valores óptimos del controlador secundario, que deben ser tal que se alcancen las posiciones angulares requeridas por el

controlador primario lo suficientemente rápido, pero sin que llegue a sobre oscilar o a oscilar de forma mantenida en el tiempo. Cabe destacar que el término derivativo se utiliza para mejorar el régimen transitorio, pero que al ir multiplicado por la derivada del error (en realidad por una aproximación de esta), puede provocar que se vea en gran medida aumentado las oscilaciones, por lo que su valor deberá ser bajo. El término integral se usará, definitivamente, para conseguir un error en régimen permanente nulo ante entradas en escalón. Finalmente, con los valores del control secundario ya fijados, se deberán retocar los del control primario para intentar llegar a la mejor respuesta posible.

Por lo tanto se desarrolló la tabla 40:

Tabla 40 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico en cascada con medición por sensor ultrasónico. Autoría propia

MÉTODO HEURÍSTICO							
	Kp_e	Ki_e	Kd_e	Kp_i	Ki_i	Kd_i	Resultado
Valores iniciales	8	0,5	8000	0	0	0	-
Ajuste 1	-	-	-	2	-	-	Malo
Ajuste 2	-	-	-	5	-	-	Malo
Ajuste 3	5	-	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 4	2	-	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 5	-	-	-	7	-	-	Mejoro
Ajuste 6	1,4	-	-	-	-	-	Bueno
Ajuste 7	-	-	7000	-	-	-	Malo
Ajuste 8	-	-	2000	-	-	-	Mejoro
Ajuste 9	-	-	900	-	-	-	Mejoro
Ajuste 10	-	-	-	-	-	0,00002	Bueno
Ajuste 11	-	-	-	-	0,1	-	Malo
Ajuste 12	-	-	-	-	0,07	-	Mejoro
Ajuste 13	-	-	-	-	0,03	-	Mejoro
Ajuste 14	-	0,2	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 15	-	0,08	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 16	-	0,05	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 17	-	-	-	-	0,022	-	Bueno
Valores finales	1,4	0,05	900	7	0,022	0,00002	PID_e/PID_i

Con todo, los parámetros elegidos se resumen en la siguiente tabla 41.

Tabla 41 Parámetros del control PID en cascada. Autoría propia

Parámetro	Control primario	Control secundario
Kp	1.4	7
Ki	0.05	0.022
Kd	900	0.00002

Con los parámetros de los controladores ya fijados y el código del programa elaborado, se está en condiciones de mostrar los resultados obtenidos en forma de

representación gráfica. Por lo tanto, con un set point de 18 cm se obtiene la respuesta de la figura 425:

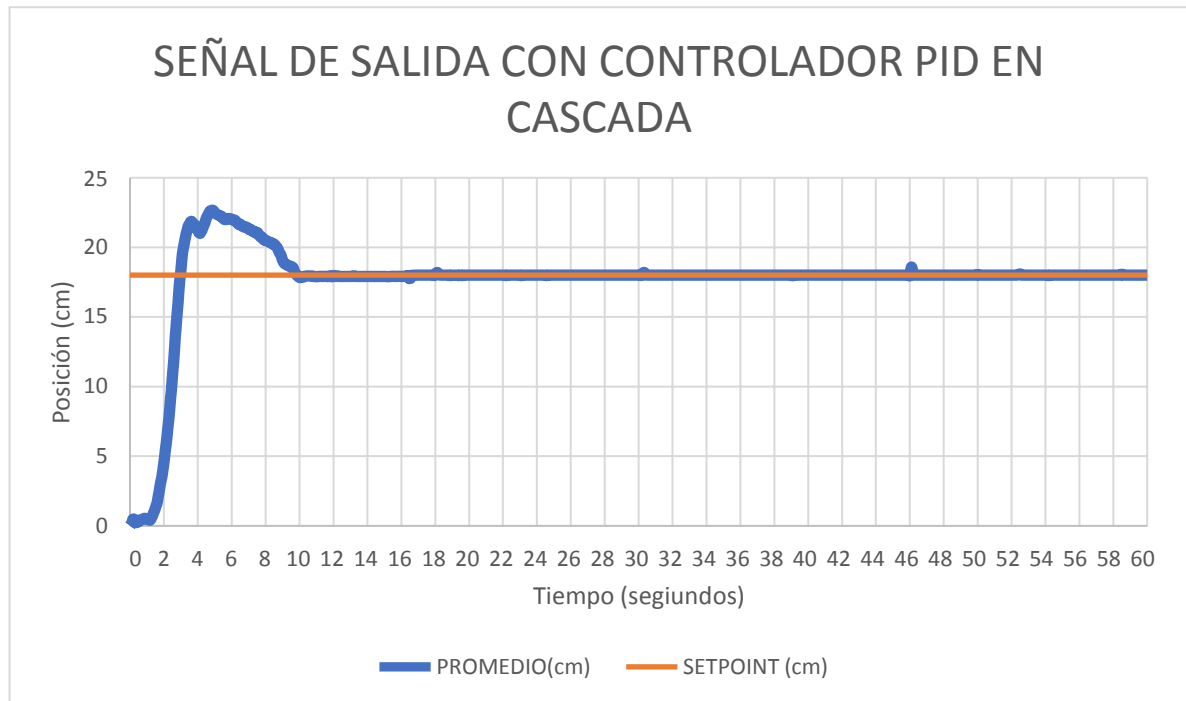


Figura 425 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada. Autoría propia

Como se puede observar en la figura 425, en el caso del control, en el que se pretende que la posición de la bola alcance la referencia solicitada, se observa en primer lugar que el sistema responde de manera bastante rápida, siendo los tiempos de subida relativamente bajos. En cuanto al régimen transitorio, se observan ciertas sobre oscilaciones de no demasiada amplitud, y en el régimen estable el sistema responde demasiado bien teniendo un error de 0,051289467 %.

11.4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA CONTROLADOR PID CLÁSICO Y PID EN CASCADA

Diseño del proceso de validación

Para el proceso de validación se tuvieron en cuenta los márgenes de respuesta del sistema ante los diferentes tipos de control (PID clásico y PID en cascada) para el régimen transitorio, así como también un estudio estadístico de los datos obtenidos para el régimen estable.

Los márgenes de respuesta en el régimen transitorio tenidos en cuenta fueron tiempo de retardo (td), tiempo de levantamiento (tr), máximo pico (Mp), tiempo pico

(t_p) y tiempo de establecimiento (t_s) ya que es un sistema con entrada de tipo escalón unitario. Estos 5 márgenes se definen como:

- Tiempo de retardo: tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez al 50% del valor final.
- Tiempo de levantamiento: tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%.
- Máximo pico: Es el valor pico máximo de la curva de respuesta
- Tiempo pico: Es el tiempo que tarda el sistema en llegar al máximo pico
- Tiempo de establecimiento: tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

El estudio estadístico se realizó con el fin de conocer la repetibilidad del sistema y la repetibilidad de respuesta ante los diferentes controladores, así como también detallar más a fondo la respuesta en estado estable, mediante indicadores como lo son la desviación estándar y el error promedio. En general se hicieron 6 experimentos, los cuales se señalan a continuación:

- Respuesta del sistema con un control PID clásico en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID clásico ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada ante una perturbación.

El estudio estadístico de todos los experimentos anteriores se realizó en base a la siguiente plantilla de ficha técnica muestral (tabla 42).

Tabla 42 Plantilla de la ficha técnica muestral con sensor ultrasónico.

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Establecer el procedimiento para el muestreo del experimento.

Estimadores muestréales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.
--------------------------------	--

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

11.4.1.Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 2 métodos de control.

11.4.1.1. Puesta del sistema de control PID clásico en la planta real

- Condiciones normales

Para la toma de datas se opta por usar el software del microcontrolador Arduino, por tal razón se realiza un pequeño programa para este tipo de control, teniendo en cuenta un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. El código (para revisar el código ver [Anexo 2](#)) se plasma en un diagrama de flujo ya mencionado en el ítems de “control PID de la planta real” en la sección de medición de posición por ultrasonido.

El proceso de la toma de datas se inicia en Arduino solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 18 cm de posición en la barra y se captura un total de 600 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato del sensor desde la placa Arduino, el dato ya en centímetros se introduce al sumador para realizar el respectivo cálculo del error y posteriormente los diferentes cálculos de los parámetros del controlador PID. Realizado esto se emite una señal que es introducida por medio de comunicación UART en el elemento final de control.

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues a la lectura del puerto analógico de la placa (puerto por donde ingresa la señal del sensor) se le agrego una señal aleatoria con un valor máximo del 0.5% del valor máximo de lectura (5 voltios), además también se debe destacar que a esta señal se le suma el ruido producido por algunos componentes de la planta.

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues en el instante de tiempo 31 se introduce una perturbación negativa la cual genera un pico de 6 cm en promedio y en el instante de tiempo 44 es retirada del sistema.

11.4.1.2. Puesta del sistema de control PID en cascada en la planta real

- Condiciones normales

Para la toma de datos se opta por usar el software del microcontrolador Arduino, por tal razón se realiza un pequeño programa para este tipo de control, teniendo en cuenta un tiempo de muestreo de 0.05 segundos para el lazo interno y de 0.1 para el lazo externo. El código (para revisar el código ver [anexo 3](#)) se plasma en un diagrama de flujo ya mencionado en el ítems de “control PID en cascada de la planta real” en la sección d medición de posición por ultrasonido.

El proceso de la toma de datos se inicia en Arduino solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 18 cm de posición en la barra y se captura un total de 600 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente tener el error de posición para que sea introducido en el controlador PID externo dando este como resultado el valor para el cálculo del error de ángulo en el lazo interno y así encontrar los parámetros del controlador PID interno, obtenido este último calculo se emite una señal por medio de comunicación UART, la cual es introducida en el elemento final de control.

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia

radica en el apartado físico pues a la lectura del puerto analógico de la placa (puerto por donde ingresa la señal del sensor) se le agrega una señal aleatoria con un valor máximo del 0.5% del valor máximo de lectura (5 voltios), además también se debe destacar que a esta señal se le suma el ruido producido por algunos componentes de la planta.

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues en el instante de tiempo 31 se introduce una perturbación negativa la cual genera un pico de 3 cm en promedio y en el instante de tiempo 35 es retirada del sistema.

11.4.2. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico

11.4.2.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID

- Condiciones normales

En la figura 426 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

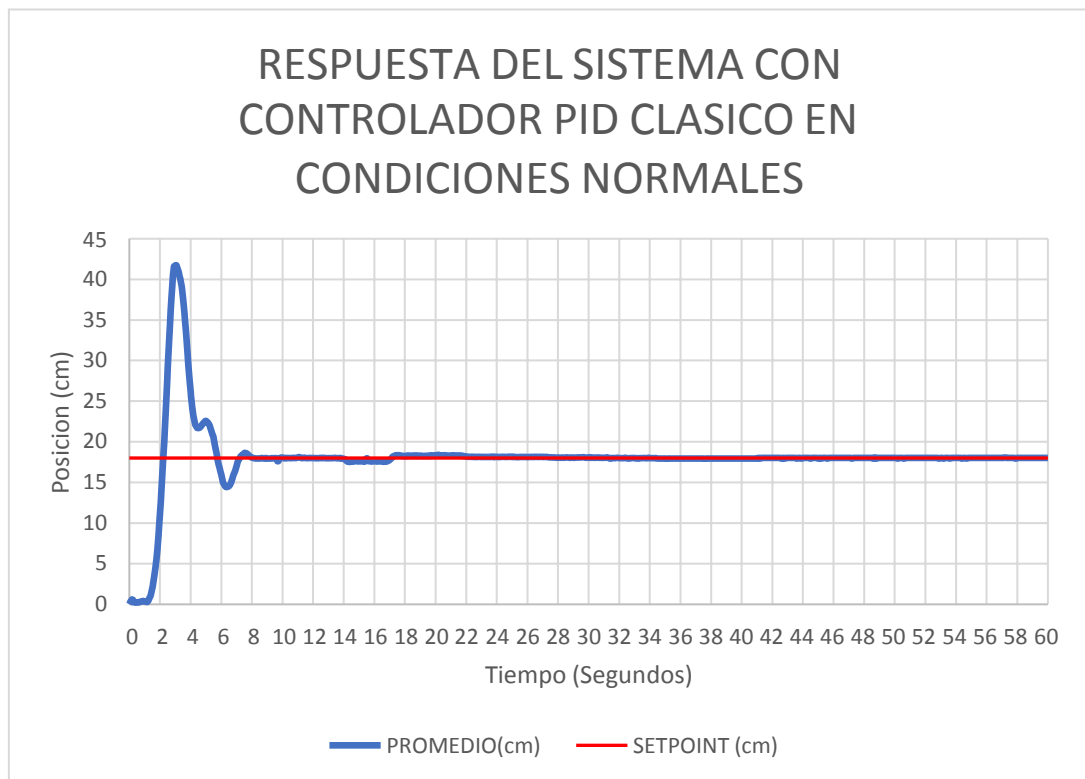


Figura 426 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en condiciones normales.
Autoría propia

Valor final (VF) = **18,03113539 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.01556 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **1.917 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.228 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2,158652199 segundos

10% de VF = 1.80311 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 1,486759843 segundos

Tr = 2.158 – 1.4867 = **0.6713 segundos**

➤ Mp:

Mp = (41.708 -18.03113539) cm

Mp = **23.6768 cm**

➤ T_p :

$t_p = 3$ segundos

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.36062 cm

De esta manera el rango es 18.3917 para el límite superior y 17.6705 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular se determina que t_s es de **18** segundos.

En la figura 427 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

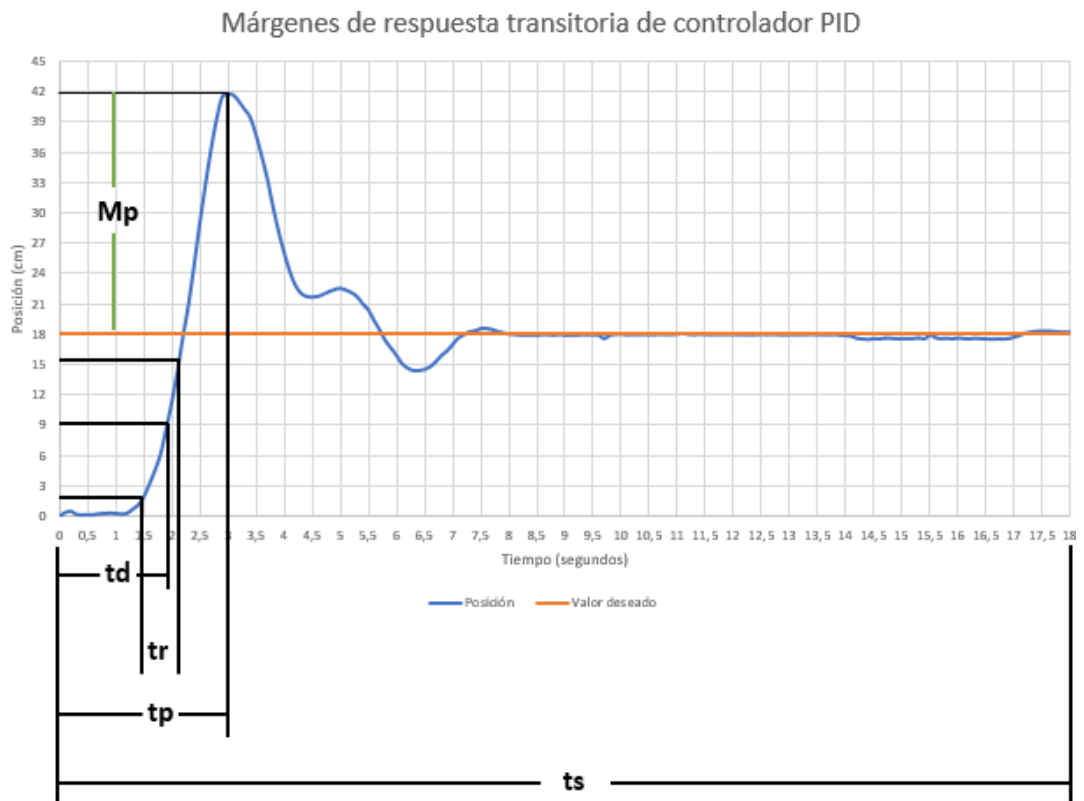


Figura 427 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID. Autoría propia

- Ruido

En la figura 428 se observa la respuesta general del sistema ante ruido

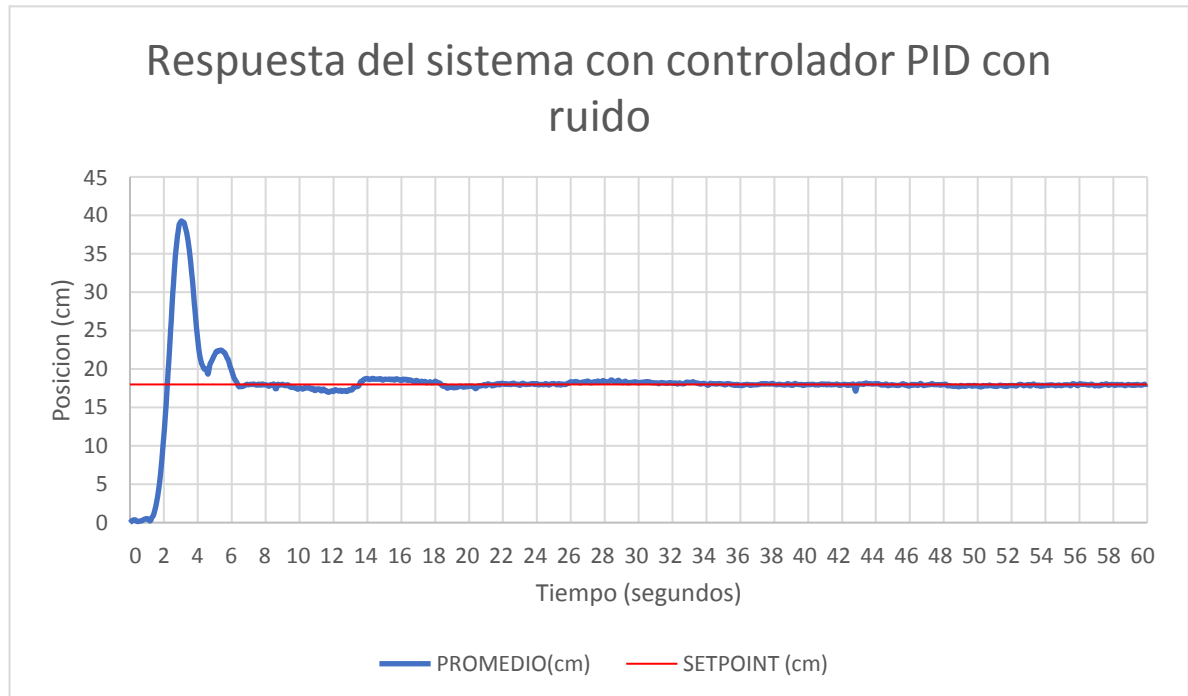


Figura 428 Respuesta del sistema con controlador PID con ruido. Autoría propia

Valor final (VF) = **18,00813777 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.004 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **1.907 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.207 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.148623 segundos

10% de VF = 1.8008 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 1.4869 segundos

Tr = 2.148623 – 1.4869 = **0.6617 segundos**

➤ Mp:

$M_p = (39.224 - 18.00813777) \text{ cm}$

$M_p = 21.2158 \text{ cm}$

➤ T_p :

$t_p = 3 \text{ segundos}$

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.360162 cm

De esta manera el rango es 18.368299 para el límite superior y 17.6479 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular guiado por la figura 429 se determina que t_s es de **34 segundos**.

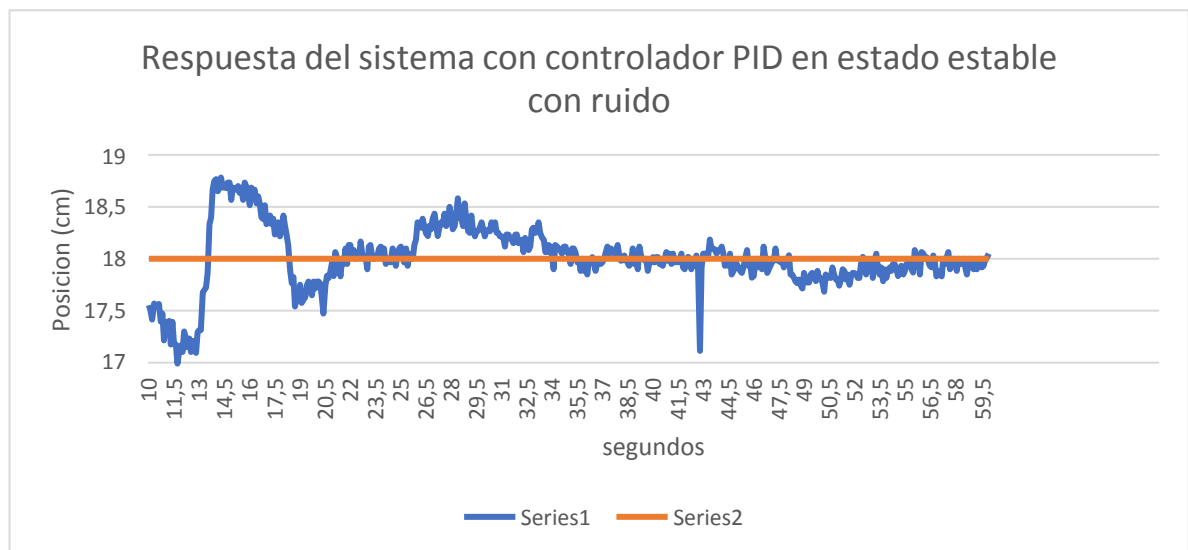


Figura 429 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido. Autoría propia

En la figura 430 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

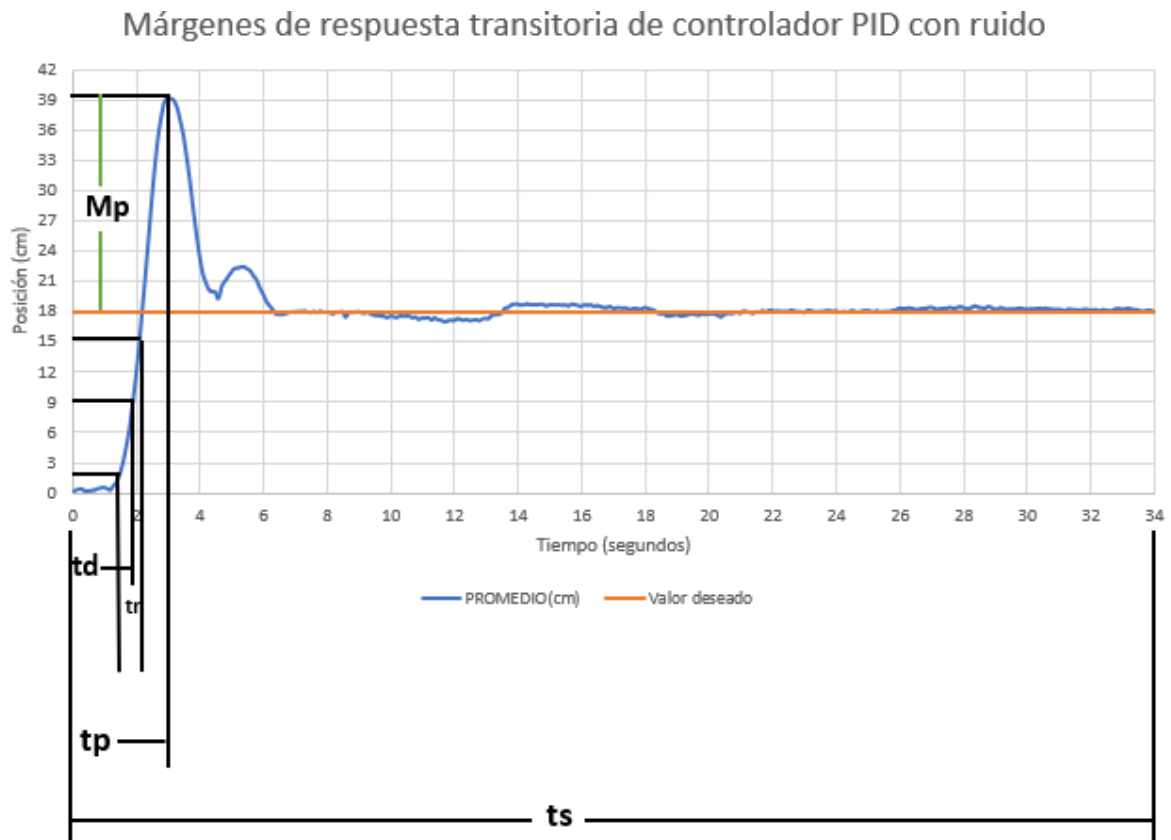


Figura 430 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con ruido. Autoría propia

11.4.2.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control PID en condiciones normales se observa en la tabla 43.

Tabla 43 Ficha técnica muestral experimento control PID en condiciones normales

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos

Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 431.

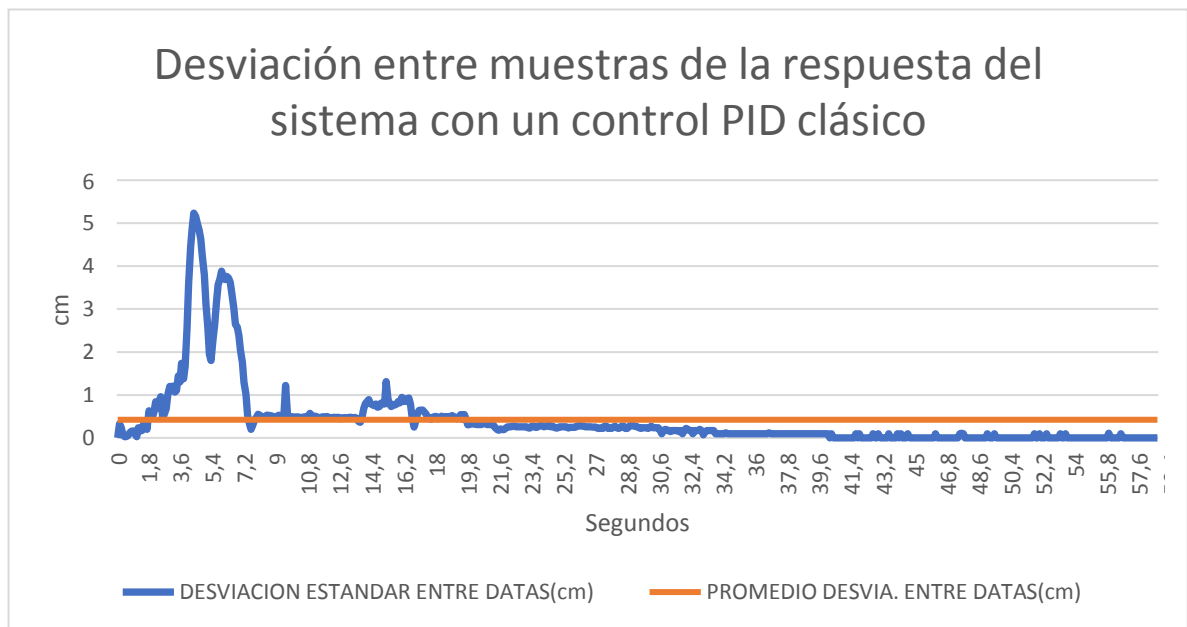


Figura 431 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID.
Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,422982437$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 18 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 432, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,09908$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,09908$ cm.

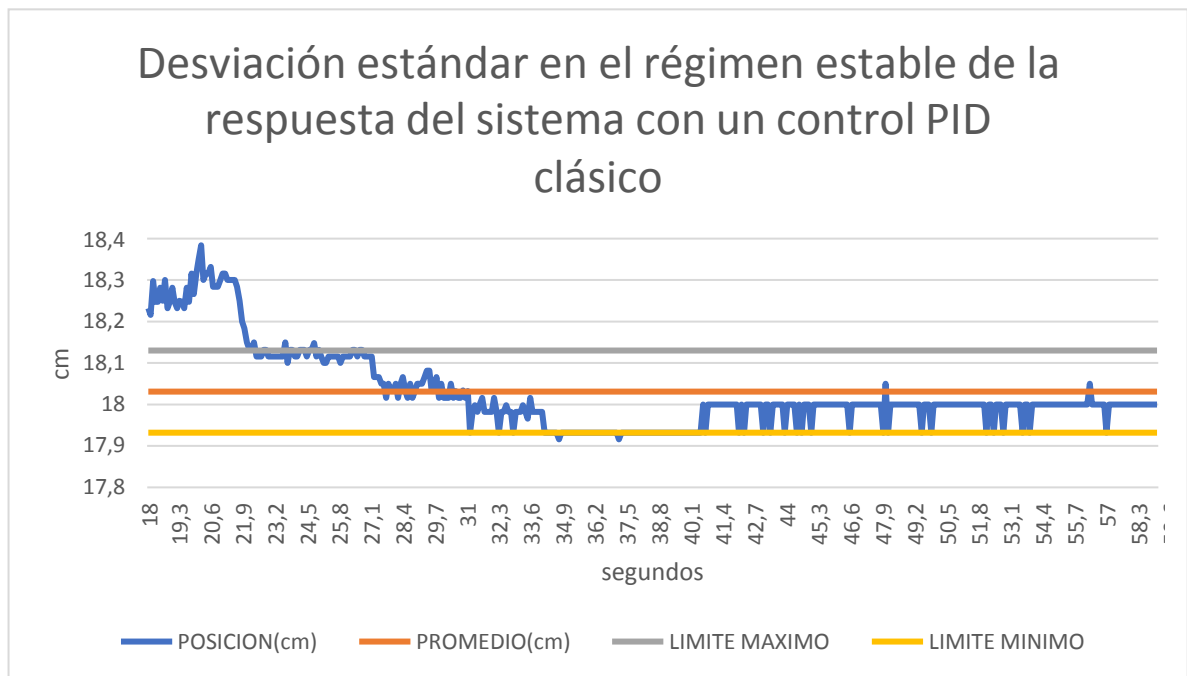


Figura 432 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 433, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,3441 %.

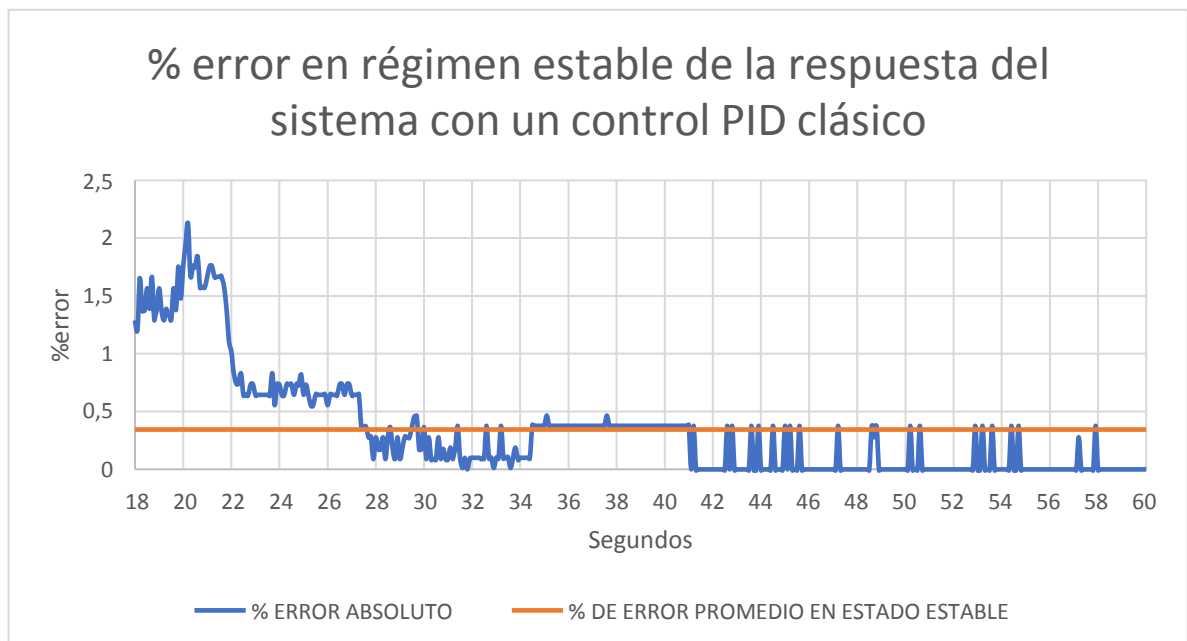


Figura 433 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control PID clásico ante ruido se observa en la tabla 44.

Tabla 44 Ficha técnica control PID ante ruido

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del 5% del valor máximo de lectura del puerto analógico.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 434.

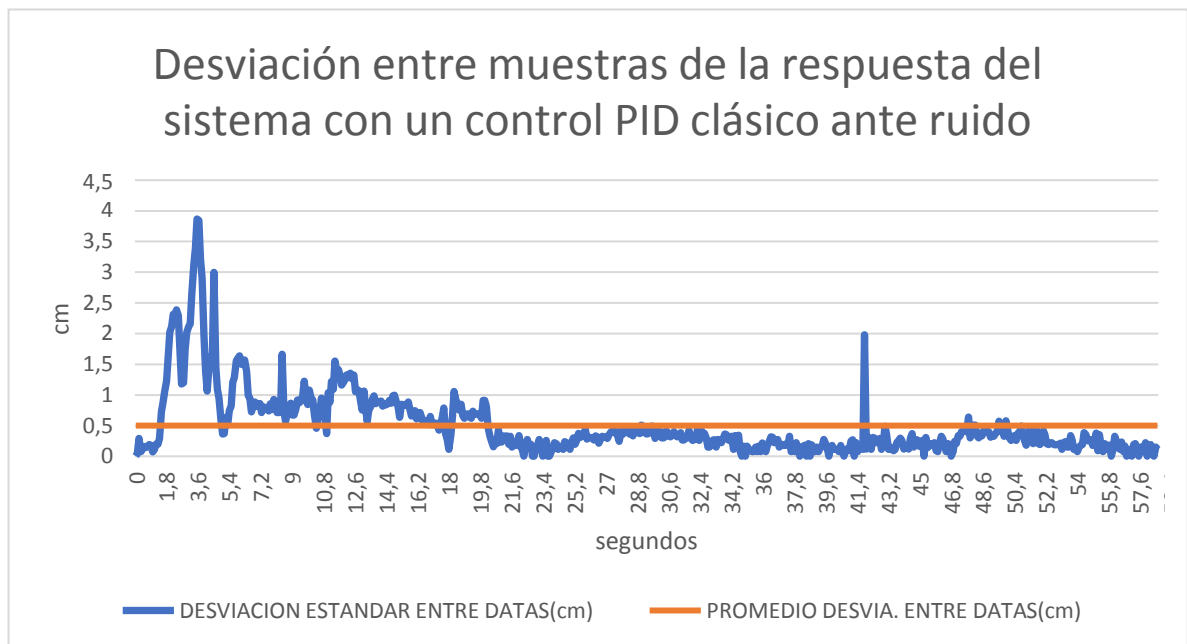


Figura 434 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,499388708$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 34 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 435, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,10609$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,10609$ cm.

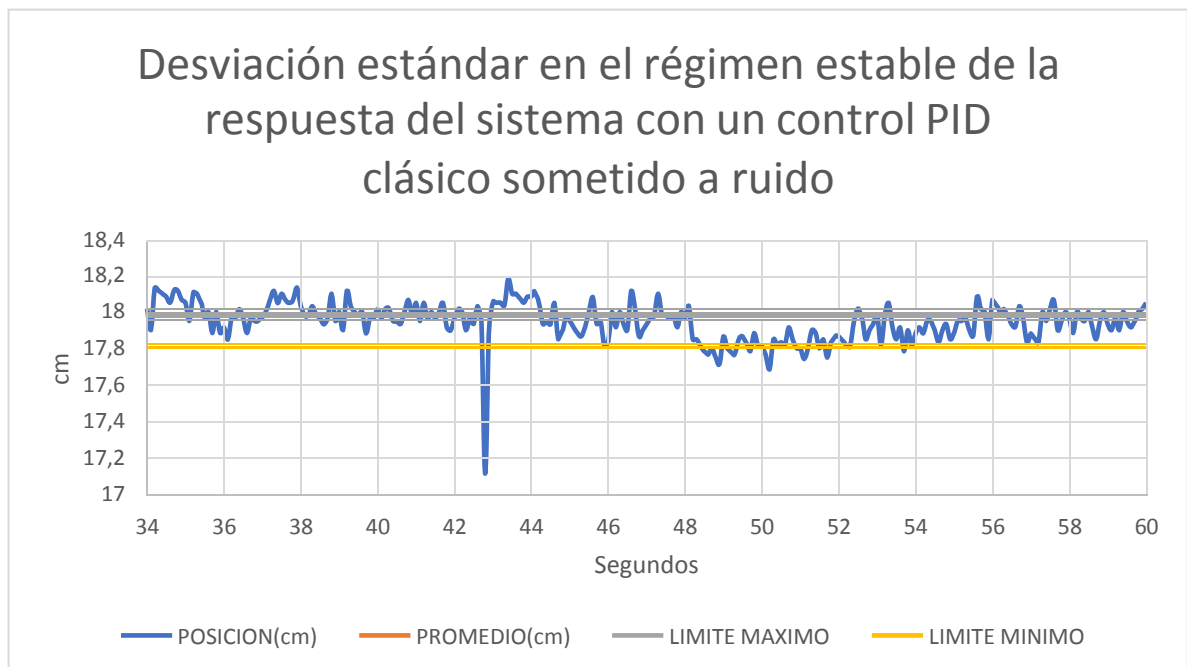


Figura 435 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 436, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,482034908%.

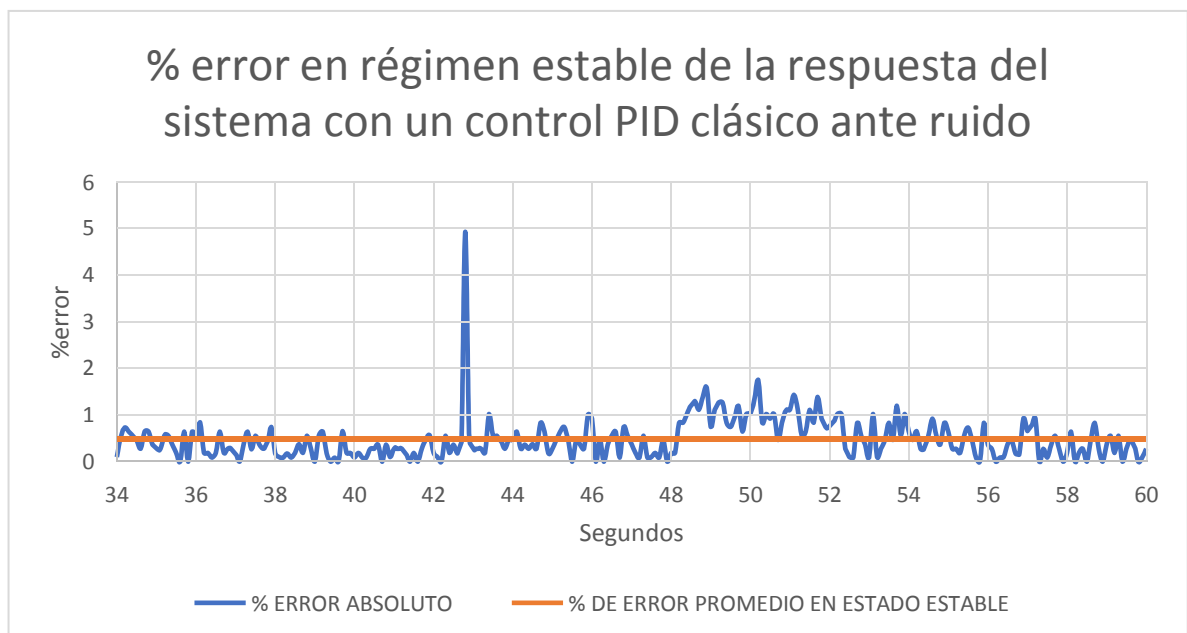


Figura 436 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico ante ruido. Autoría propia

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control PID clásico ante perturbación se observa en la tabla 45.

Tabla 45 Ficha técnica control PID ante perturbación

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 6 cm en el instante de tiempo de 31 segundos y 13 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestrales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

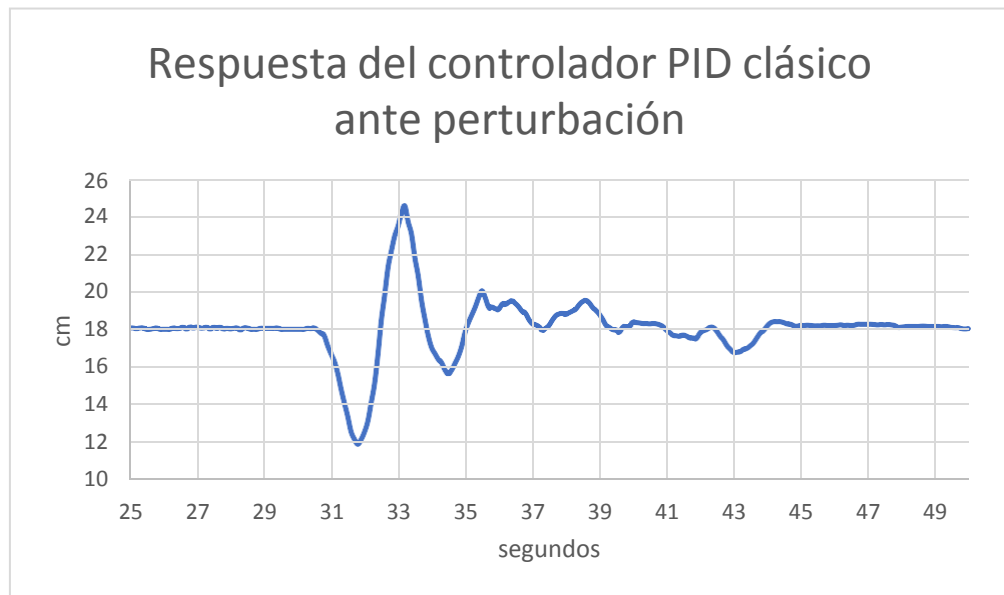


Figura 437 Respuesta del controlador PID clásico ante perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 437 en el instante de tiempo 31 (aproximadamente) se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 6 cm llevando la posición del carro a un valor de 23.72 cm y oscila en el sistema durante 13 segundos, en este transcurso de tiempo el controlador solo logra reducir la perturbación un 92.7% llevando el sistema a un valor de 18,13 cm por lo que en definitiva logro compensar casi todo el valor de la perturbación.

11.4.3. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico en cascada

11.4.3.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID en cascada

- Condiciones normales

En la figura 438 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

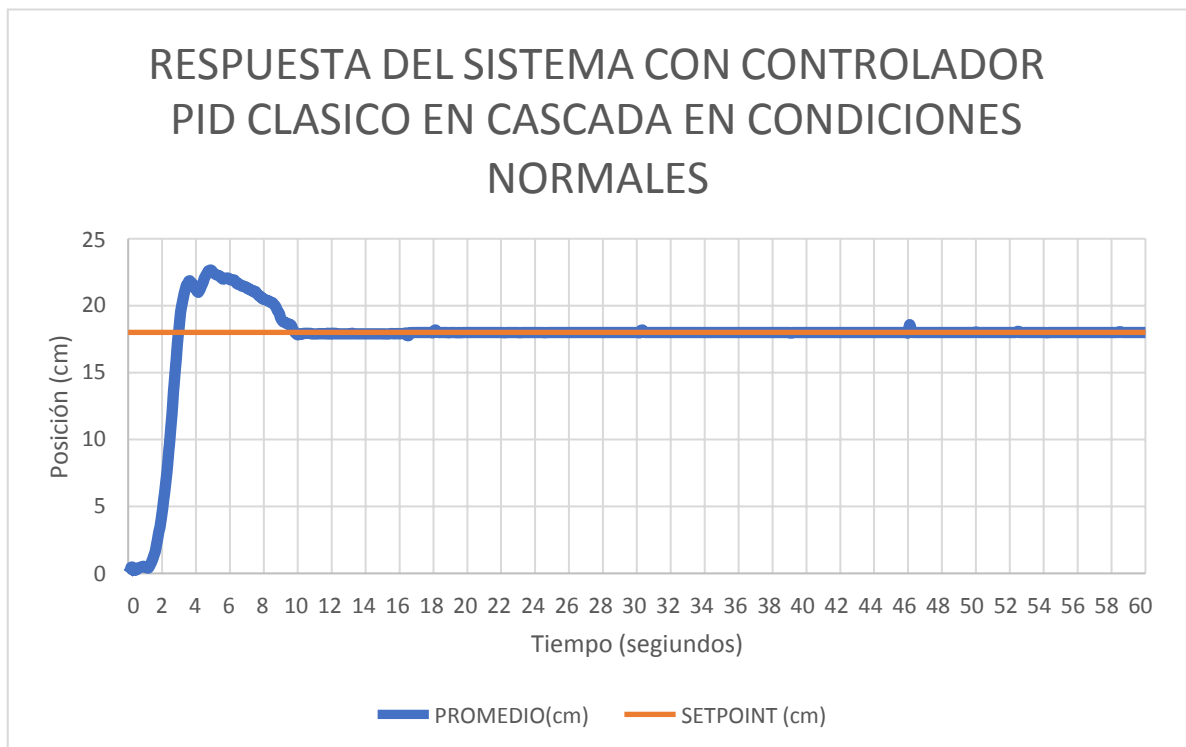


Figura 438 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en cascada en condiciones normales. Autoría propia

Valor final (VF) = **17,9966 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 8.9983 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **2.3835 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.19694 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.8399 segundos

10% de VF = 1.79966 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 1.617485 segundos

$tr = 2.8399 - 1.617485 = \mathbf{1.222415 \text{ segundos}}$

➤ Mp:

$Mp = 22.644 - 17.9966$

$Mp = \mathbf{4.6474}$

➤ T_p :

$t_p = 4.9$ segundos

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.359932 cm

De esta manera el rango es 18.356532 para el límite superior y 17.636668 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular se determina que t_s es de **14** segundos.

En la figura 439 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

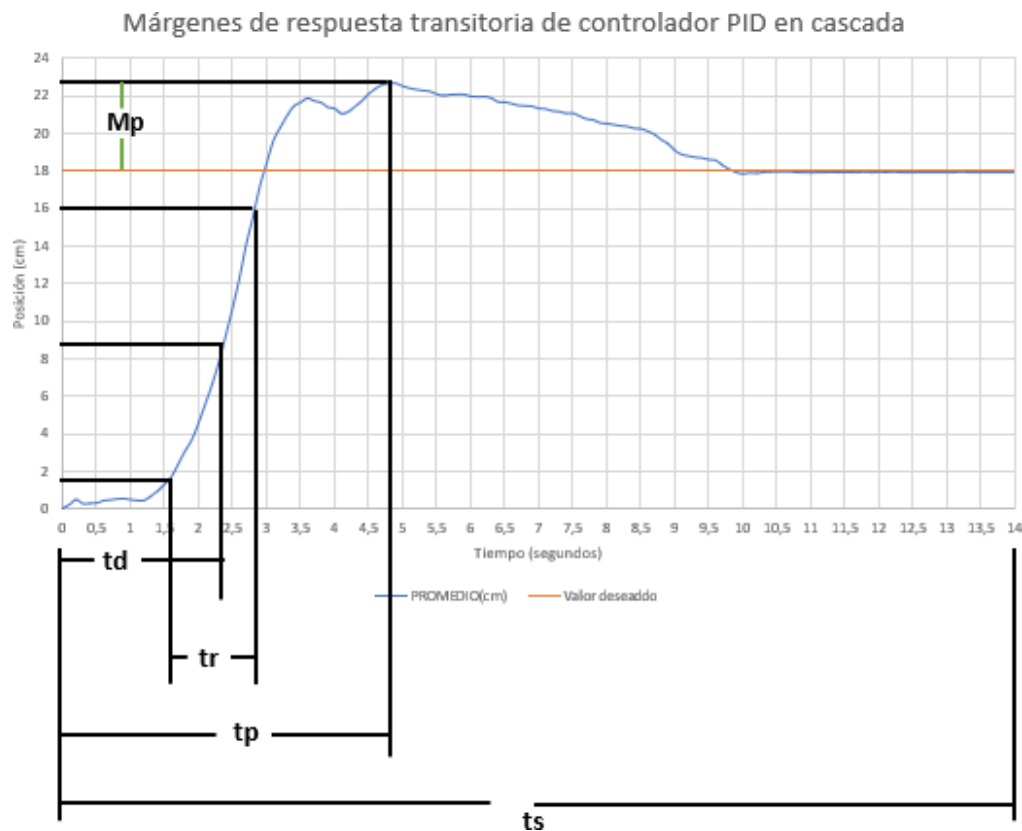


Figura 439 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada. Autoría propia

- Ruido

En la figura 440 se observa la respuesta general del sistema ante ruido

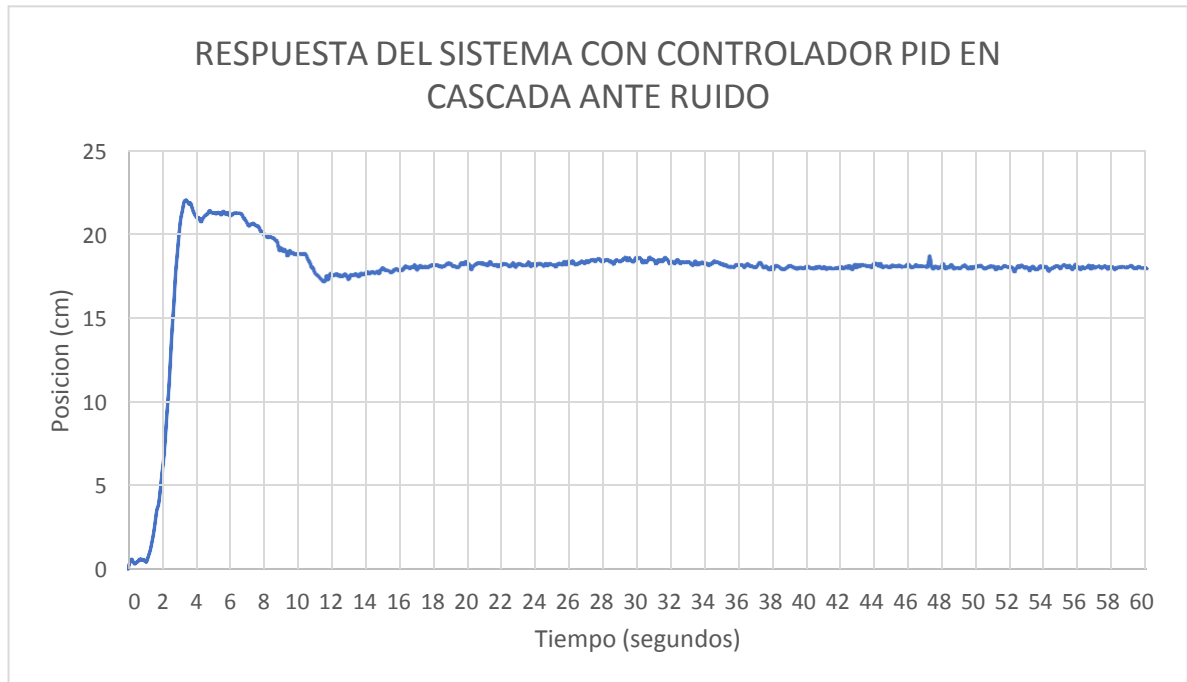


Figura 440 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada con ruido. Autoría propia

Valor final (VF) = **18,0946 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.0473 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **2.2787935 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.28514 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2.728 segundos

10% de VF = 1.80946 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 1.4489779 segundos

Tr = 2.728 – 1.4489779 6 = **1.279 segundos**

➤ Mp:

Mp = 22.008 – 18.0946

$M_p = 3.9134 \text{ cm}$

➤ T_p :

$t_p = 3.4 \text{ segundos}$

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.361892 cm

De esta manera el rango es 18.456492 para el límite superior y 17.732708 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular guiado por la figura 441 se determina que t_s es de **31 segundos**.

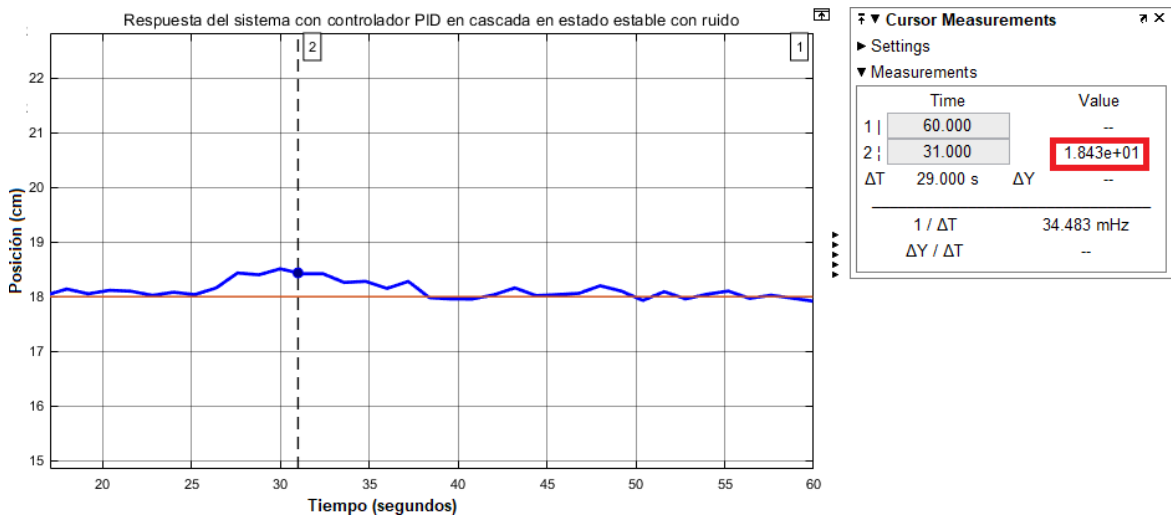


Figura 441 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido. Autoría propia

En la figura 442 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con ruido

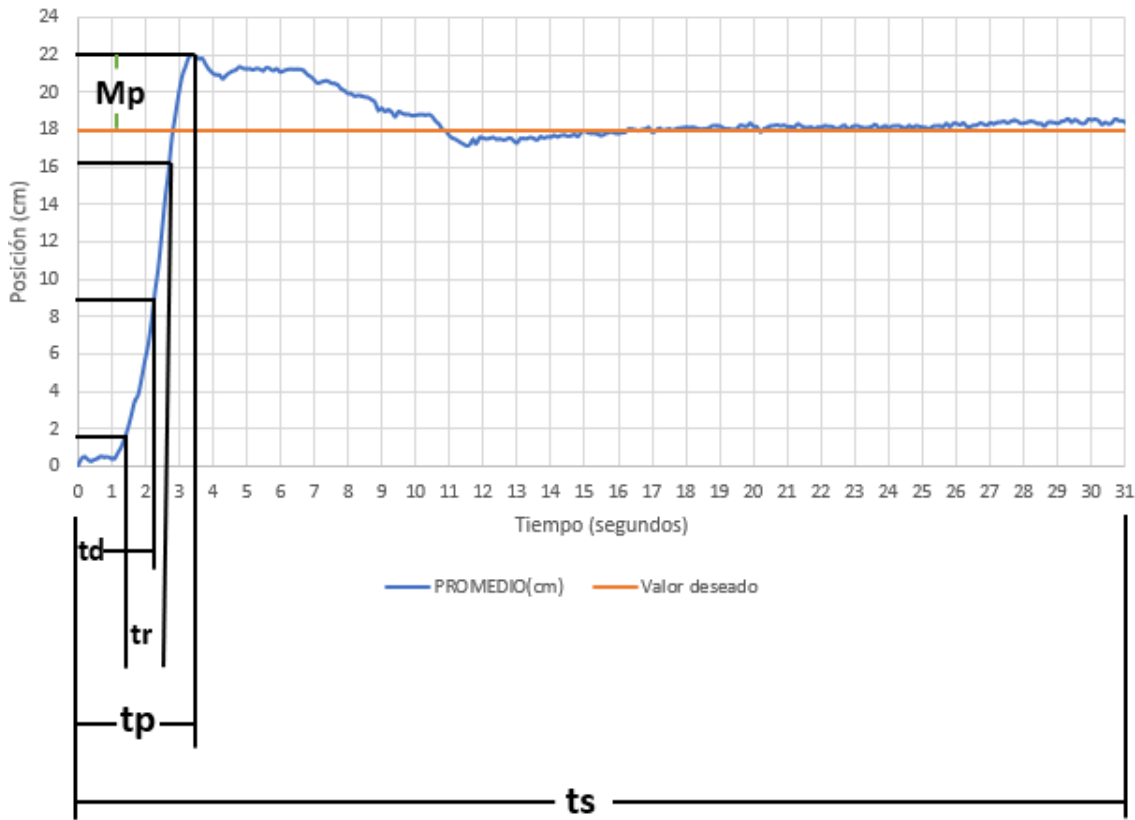


Figura 442 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con ruido. Autoría propia

11.4.3.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID clásico en cascada

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control PID en condiciones normales se observa en la tabla 46.

Tabla 46 Ficha técnica muestral experimento control PID en cascada en condiciones normales

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.

Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada de intervalo de 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestréales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 443.

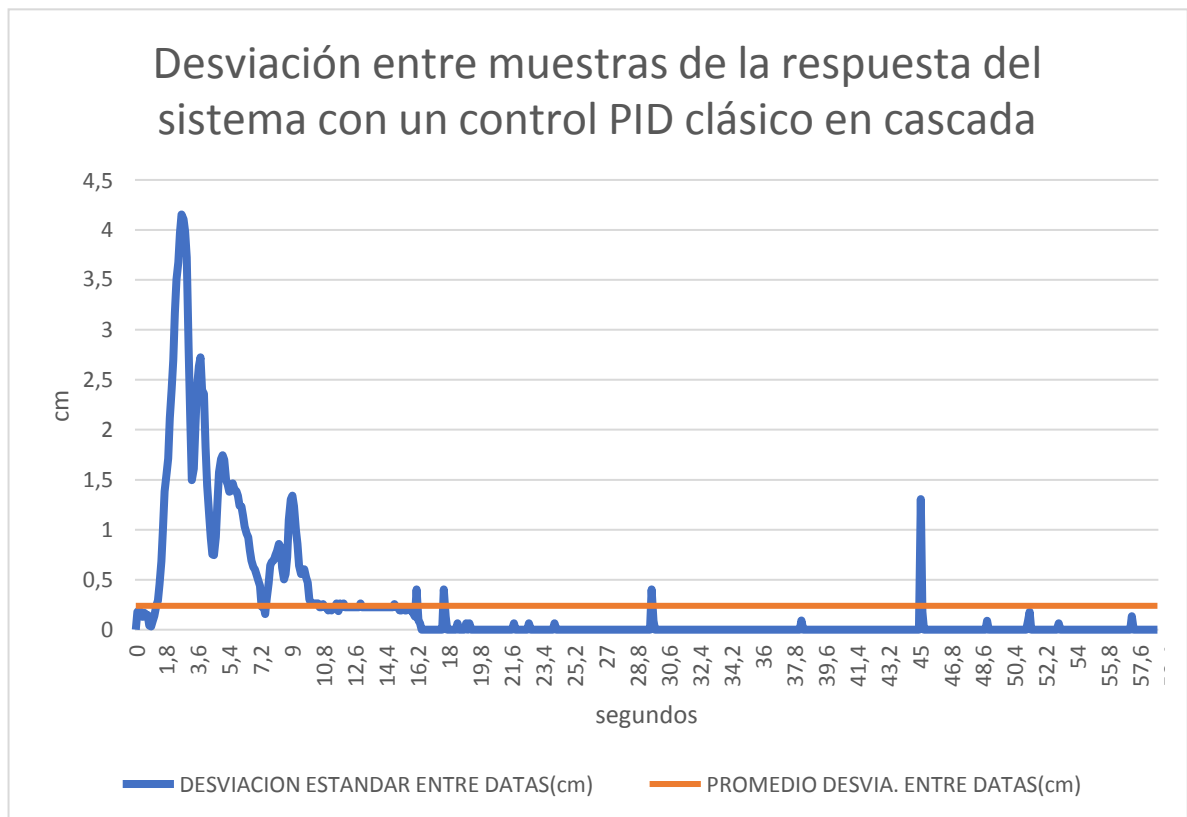


Figura 443 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID en cascada. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,239946351$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 14 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 444, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,039578726$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,039578726$ cm.

Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID en cascada

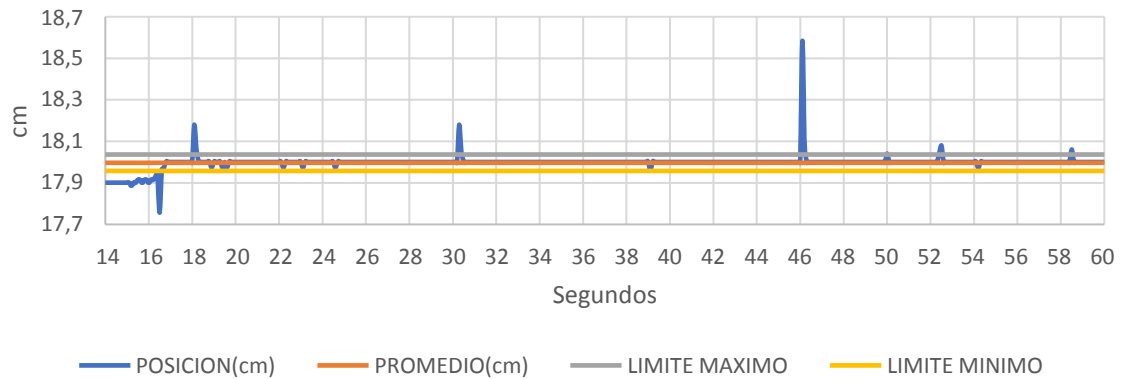


Figura 444 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 445, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,051289467 %.

% error en regimen estable de la respuesta del sistema con un control PID en cascada

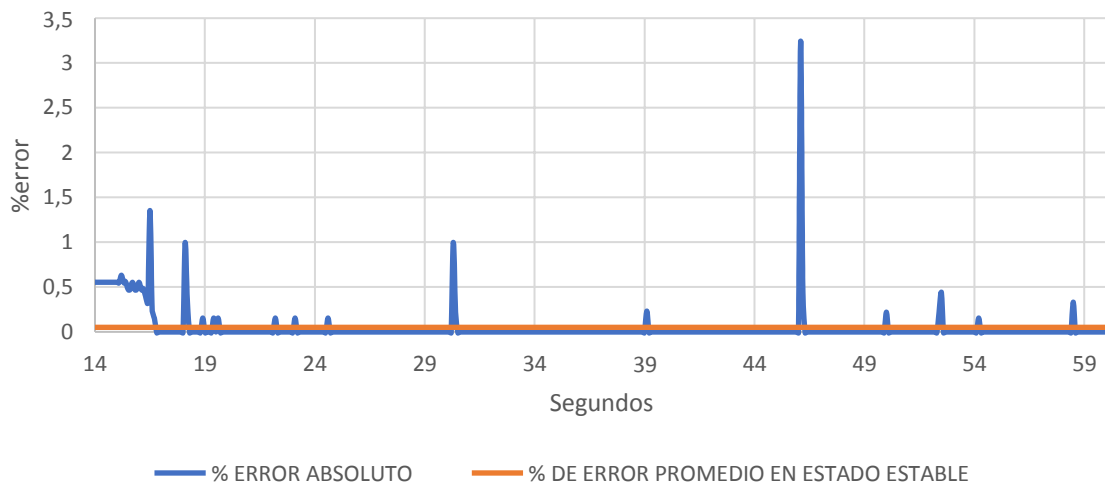


Figura 445 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada. Autoría propia

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control PID clásico en cascada ante ruido se observa en la tabla 47.

Tabla 47 Ficha técnica control PID en cascada ante ruido

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada durante 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del 5% del valor máximo de lectura del puerto analógico.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 446.

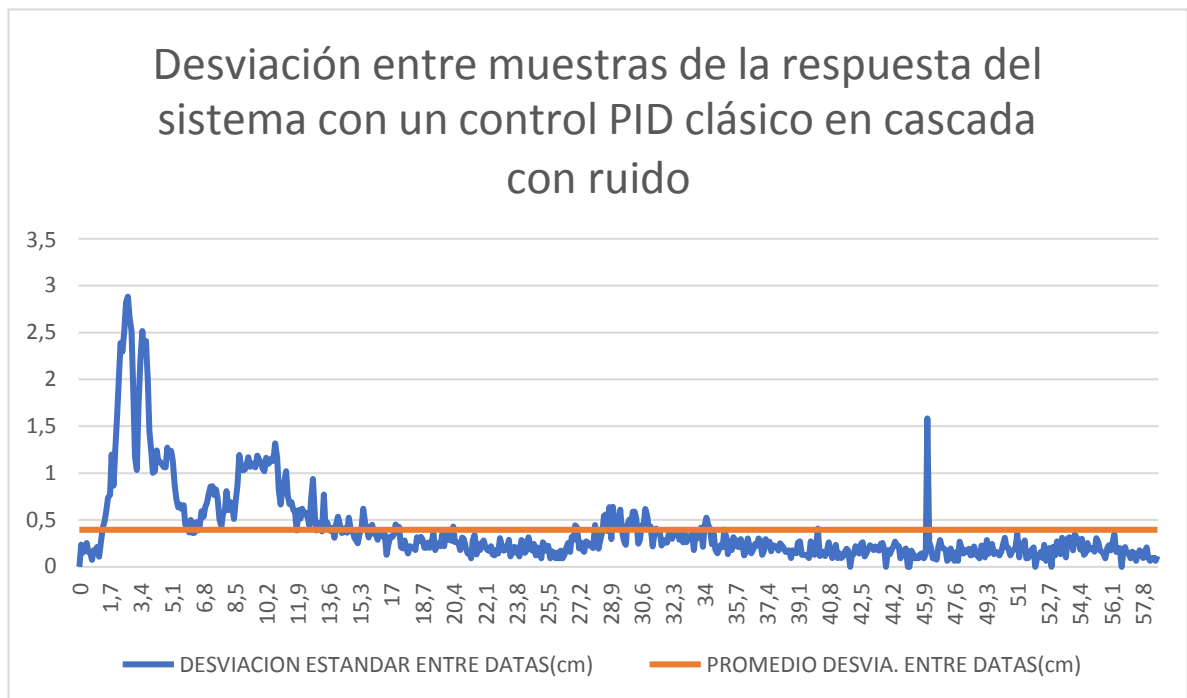


Figura 446 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,394767608$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 31 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 447, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,133254838$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,133254838$ cm.

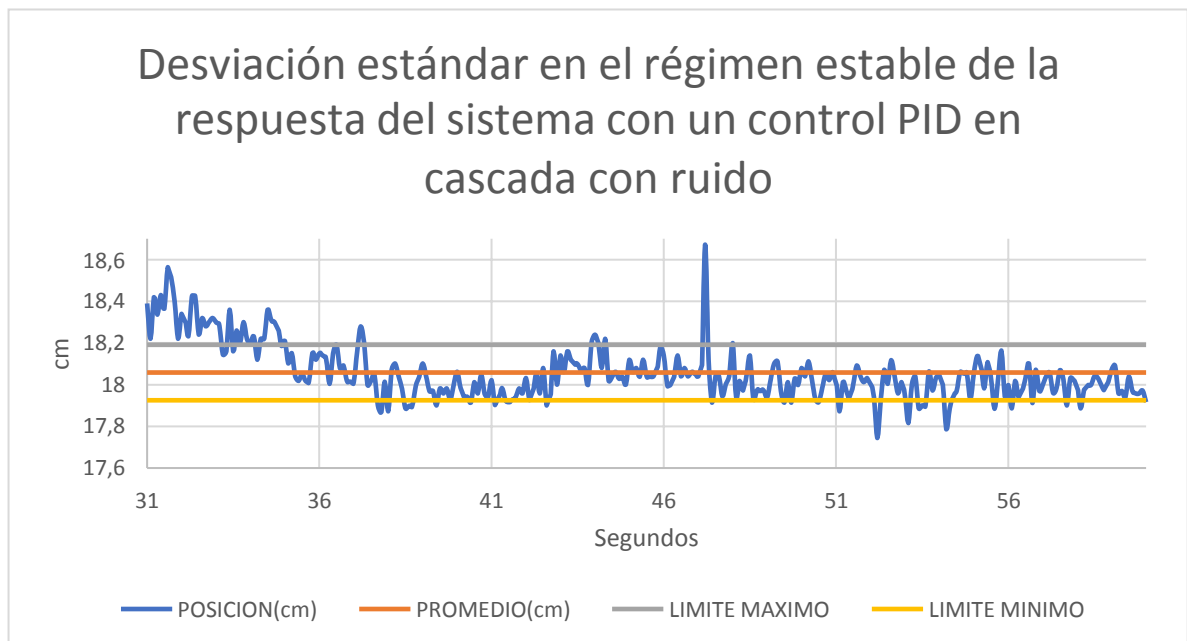


Figura 447 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 448, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,448298483 %.

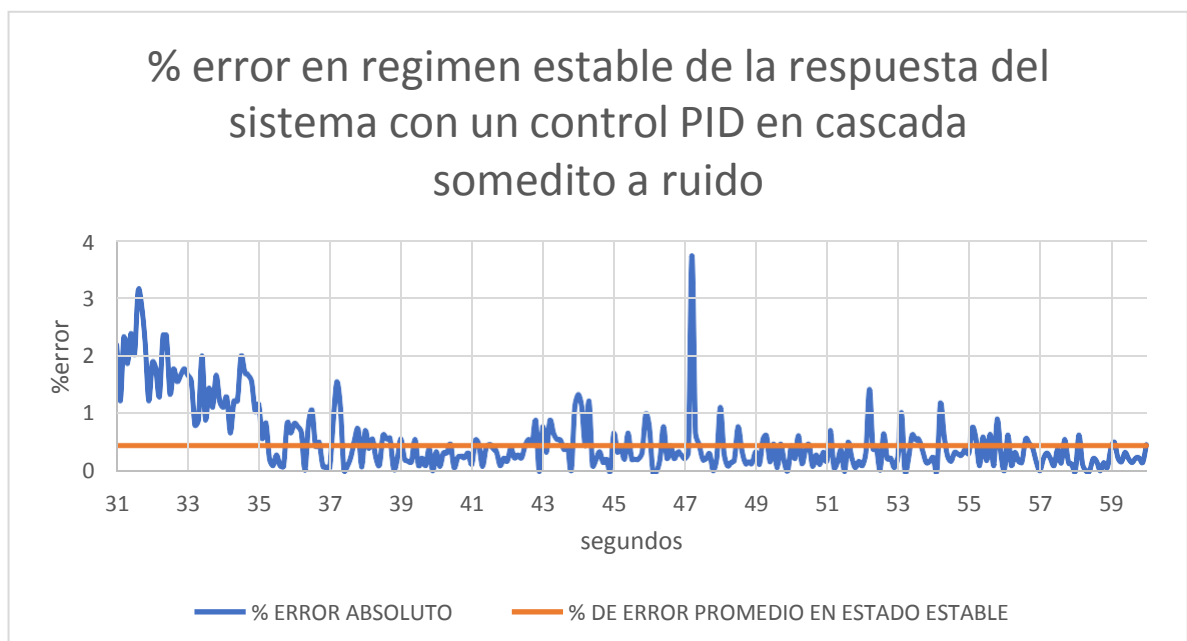


Figura 448 error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada ante ruido. Autoría propia

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control PID clásico en cascada ante perturbación se observa en la tabla 48.

Tabla 48 Ficha técnica control PID en cascada ante perturbación

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	600 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada durante 60 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 3 cm en el instante de tiempo de 31 segundos y 4 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestrales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

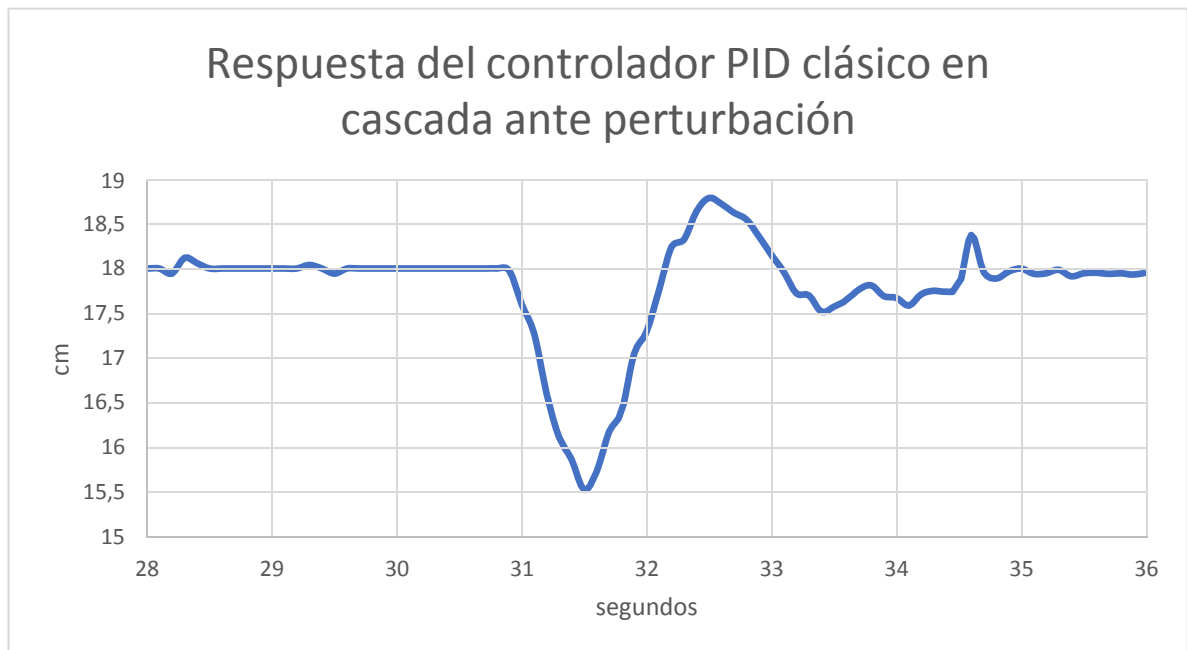


Figura 449 Respuesta del controlador PID clásico en cascada ante perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 449 en el instante de tiempo 31 (aproximadamente) se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 3 cm llevando la posición del carro a un valor de 15.522 cm y oscila en el sistema durante 13 segundos, en este trascurso de tiempo el controlador solo logra reducir la perturbación un 99.5% llevando el sistema a un valor de 17.95 cm por lo que en definitiva logro compensar el valor de la perturbación.

11.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados del inciso anterior se resumen en la tabla 49.

Tabla 49 Resultados generales de los experimentos. Autoría propia

Resultados en condiciones normales y perturbación									
C O N T R O L	Experimento	Régimen transitorio					Régimen estable		
		td	tr	tp	Mp (cm)	ts	Desviación estándar en régimen estable (cm)	Punto de asentamiento (cm)	% de error promedio en régimen estable (%)
P I D	Normal	1.917	0.6713	3	23.6768	18	0.09908	18.0311	0.3441
	Ruido	1.907	0.6617	3	21.2158	34	0.10609	18.00813	0.482
PID en cascada	Normal	2.3838	1.2224	4.9	4.6474	14	0.0395	17.9966	0.05128
	Ruido	2.278	1.279	3.4	3.9134	31	0.133	18.0946	0.448
Resultados ante perturbación									
	Estabiliza Si o No					Tiempo de respuesta a la perturbación (s)			
PID	Si					13			
PID en cascada	Si					4			

Para analizar los resultados se partió por seleccionar a los indicadores con mayor deficiencia en la respuesta tanto en el régimen transitorio como estable y partiendo de los mismos se hallaron los porcentajes de mejora de los demás respecto a dichos indicadores, haciendo uso en todos los casos de la ecuación 60.

$$\% \text{ mejora} = \frac{|\text{Indicador referencia} - \text{Indicador a evaluar}|}{\text{Indicador referencia}} \times 100 \% \quad (60)$$

Se evalúan cada uno de los indicadores y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 50 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia. Autoría propia

Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia						
condiciones	Régimen	Indicador	Mayor deficiencia	Valor (s)	Menor deficiencia	% de mejora
En condiciones normales	Régimen transitorio	td	PID en cascada	2.3835	PID	19.57
		tr	PID en cascada	1.222415	PID	45.084
		tp	PID en cascada	4.9	PID	38.7755
		Mp	PID	23.6768	PID en cascada	80.3715
		ts	PID	18	PID en cascada	22.222
	Régimen estable	Desviación en estado estable	PID	0.09908	PID en cascada	60.133
		% error en estado estable	PID	0.3441	PID en cascada	85.097
Ante ruido	Régimen transitorio	td	PID en cascada	2.278	PID	16.28
		tr	PID en cascada	1.279	PID	48.2642
		tp	PID en cascada	3.4	PID	11.76
		Mp	PID	21.2158	PID en cascada	81.5543
		ts	PID	34	PID en cascada	8.8235
	Régimen estable	Desviación en estado estable	PID en cascada	0.133	PID	20.23
		% error en estado estable	PID	0.482	PID en cascada	7.0539

Lo anterior (tabla 50) transpone los resultados entre controladores, marcando la comparación entre los controladores en condiciones normales y ante ruido. Pero también se hace necesario comparar los cambios de cada tipo de control ante el ruido, es decir, evaluar como afecto el ruido su propia dinámica. Para lo cual se calculó el porcentaje de afectación de cada control tras el efecto del ruido, donde no se considera si el cambio arroja o no mejores márgenes, sino como cambio su dinámica frente a dicho ruido. Lo resultados de lo anterior se observan en la tabla 51 y se calcularon en base a la ecuación 61.

$$\% \text{ afectación} = \frac{|\text{Condiciones normales} - \text{Ante ruido}|}{\text{Condiciones normales}} \times 100 \% \quad (61)$$

Tabla 51 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control . Autoría propia

Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control										
Control	Indicadores		Régimen transitorio					Régimen estable		
			td(s)	tr(s)	tp(s)	Mp(cm)	ts(s)	Desviación estándar en régimen estable (cm)	Punto de asentamiento (cm)	% de error promedio en régimen estable (%)
PID	Experimento	Normal	1.917	0.6713	3	23.6768	18	0.09908	18.0311	0.3441
		Ruido	1.907	0.6617	3	21.2158	34	0.10609	17.9463	0.482
	% de Afectación		0.5216	1.43	0	10.394	88.88	7.075	0.4703	40.075
PID en cascada	Experimento	Normal	2.3835	1.222415	4.9	4.6474	14	0.0395	17.9966	0.05128
		Ruido	2.278	1.279	3.4	3.9134	31	0.133	18.0581	0.448
	% de Afectación		4.426	4.6289	30.612	15.79	121.428	236.71	0.3417	473.54

Resaltando los resultados obtenidos en el régimen estable, ya que es el régimen de interés principal de esta investigación, en la comparación entre controladores en condiciones normales se obtuvo que el controlador PID fue el más deficiente en cuanto a la desviación en estado estable, donde el controlador PID en cascada lo mejoro un 60.133 %. En cuanto al error en estado estable el controlador PID también obtuvo la mayor deficiencia siendo mejorado por el PID en cascada en 85.097 %.

El patrón de resultados anterior se repitió para el porcentaje de error en estado estable donde el control PID obtuvo los mejores resultados con una afectación del 40.075% y luego control PID en cascada con un 473.54%.

12. CONTROL DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL

12.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Inicialmente para poder hacer visión artificial en la planta se debe realizar un tratamiento o procesamiento digital de la imagen, este proceso se llevará a cabo en el software Matlab (ver código completo [anexo 10](#)) aplicando varias técnicas a la captura de la imagen obtenida por la cámara, con el fin de buscar información para saber el posicionamiento del carro en la barra.

Lo primero que se realiza es un ajuste de dimensiones a la región de interés de la visión de la cámara, la cual será ajustada mediante la Apps de Matlab “Image Acquisition”.

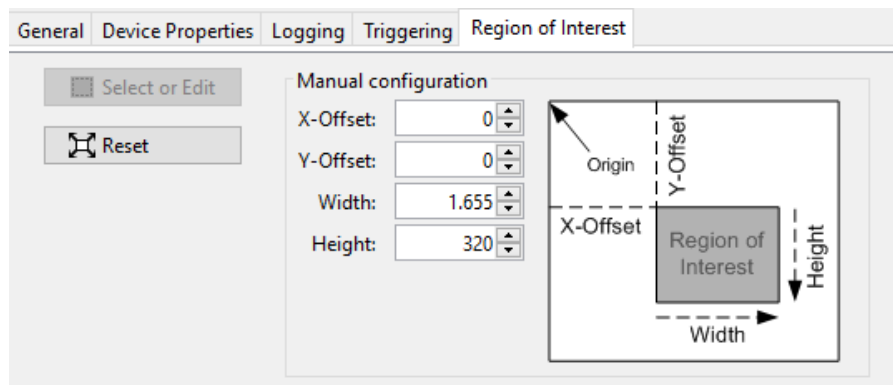


Figura 450 Parámetros de ajuste para la imagen. Autoría propia

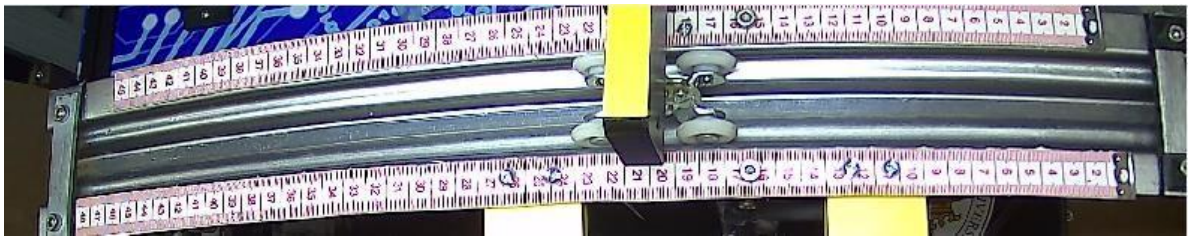


Figura 451 Región de interés de la imagen. Autoría propia

Luego de esto, el paso a seguir en el código es hacer un capture de imagen como se ve en la figura 450, seguidamente se hace una breve rotación a esta de -3 grados y después se hace un recorte a la imagen.



Figura 452 Rotación de la imagen a - 3 grados. Autoría propia

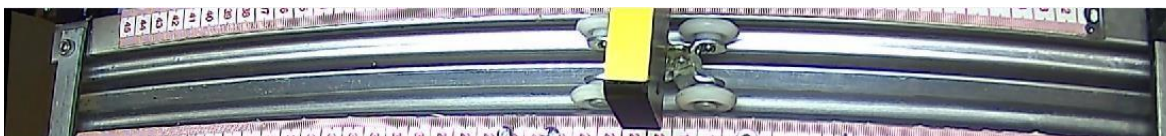


Figura 453 Recorte de la imagen. Autoría propia

Teniendo la imagen recortada se hace un filtro de colores RGB (código [anexo 17](#)) para el objeto que será tomado como guía para saber la posición en la barra.

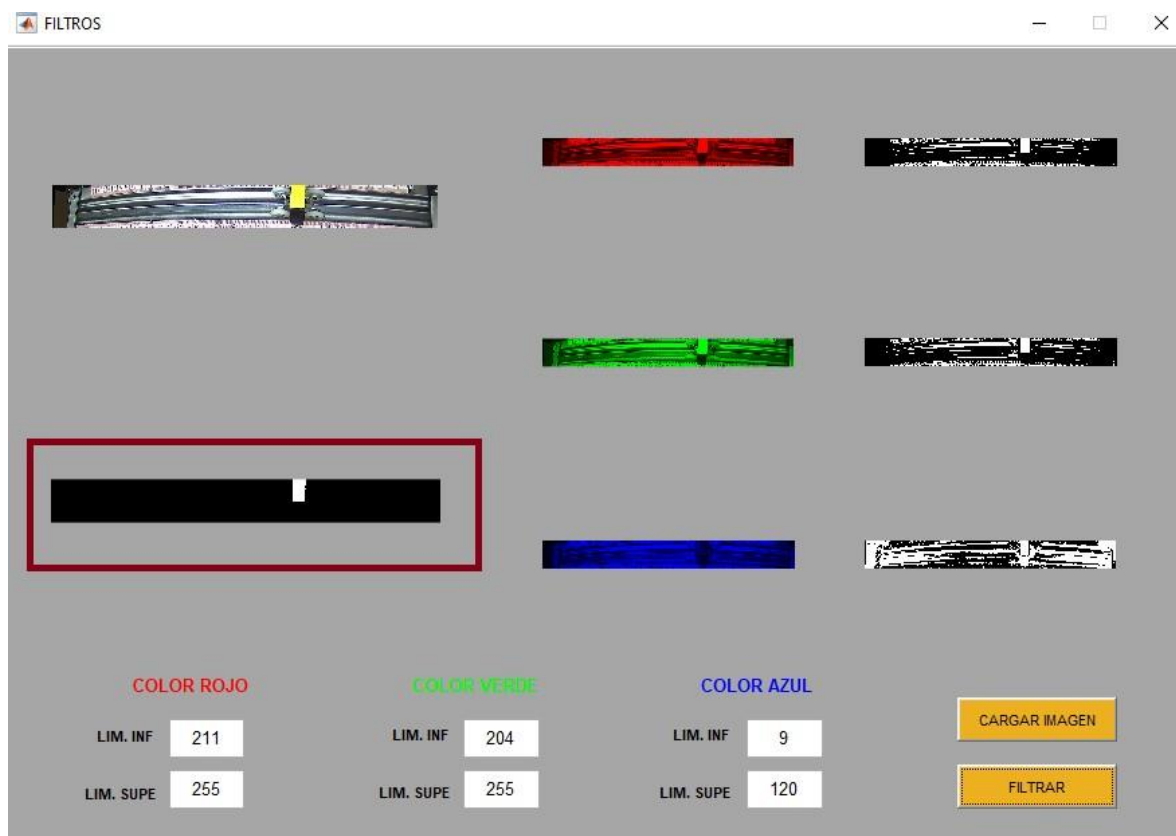


Figura 454 Filtro RGB para imagen. Autoría propia

AL realizar el filtrado se hace un relleno desde el extremo y posterior a esto se eliminan los pixeles menor a 30 y finalmente se encuentra el centroide, con el fin de usar el valor en x para el cálculo de visión artificial.



Figura 455 Imagen con relleno. Autoría propia



Figura 456 Imagen sin pixeles menor a 30 y con centroide. Autoría propia

12.2. PROCESO MATEMÁTICO PARA VISIÓN ARTIFICIAL

Habiendo realizado todo el respectivo proceso de tratamiento digital de imagen, se puede pasar a la etapa de visión artificial, en donde por medio de una matriz de 2 filas y 44 columnas se analizará los datos obtenidos del centroide en x con los datos de la cinta métrica.

```
A = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
      1627.1 1586 1547.1 1510 1474.4 1434.2 1397 1356.2 1313.9 1271.5 1228.9 1186.5 1143.7
```

Figura 457 Matriz de datos de 2 filas y 44 columnas. Autoría propia

Teniendo esta matriz se procede a realizar un cálculo matemático para la conversión de los datos del centroide en x a los datos reales en cm según la cinta métrica.

```
for nn = 1:1:43
    if (distancia_total_1<=A(2,nn) && distancia_total_1>=A(2,nn+1))
        distancia_total=A(1,nn)+((A(1,nn)-A(1,nn+1))/(A(2,nn+1)-A(2,nn)))*(A(2,nn)-distancia_total_1);
    end
end
```

Figura 458 Calculo para conversión a cm. Autoría propia

12.3. CONTROL PID DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL

Como se indicó en los Ítems relativos a las Simulaciones, el sistema "Ball and beam" no puede ser controlado simplemente con un controlador proporcional, ya que, debido a su doble integrador en el proceso, la salida en bucle abierto sería la de un sistema críticamente estable. En consecuencia, la primera propuesta que se hace para controlar la planta real es un controlador PID clásico con visión artificial.

Para llevar a cabo este controlador se usa el software de Arduino y Matlab, en donde en el primero se hace un programa que realiza el cálculo de la acción de control y su paso al servomotor para que actúe consecuentemente y en el segundo se ejecuta un programa para el desarrollo de la visión artificial, el cual calcula la medición en el tiempo.

En términos generales, el bucle que se repite continuamente en el Arduino tiene la estructura que se encuentra en el siguiente diagrama de flujo (código [anexo 4](#)).

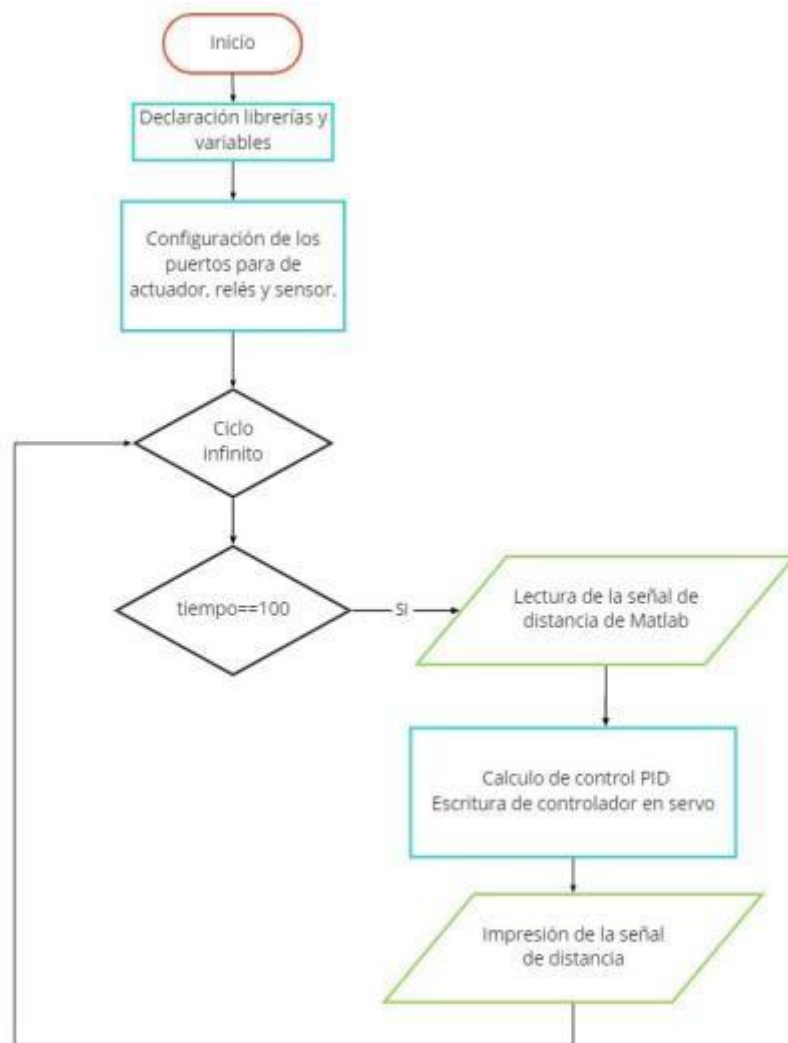


Figura 459 Diagrama de flujo de código de controlador PID con medición por visión artificial.
Autoría propia

Una vez se tiene el programa que implementa el control, se puede pasar al diseño de los parámetros del controlador PID. Para ello, si bien se utilizarán como partida los resultados obtenidos en las simulaciones de los ítems anteriores, se diseñarán siguiendo un método heurístico en el que se elegirá en primer lugar una ganancia del controlador que sea lo suficientemente grande para activar el sistema pero sin que provoque sobre oscilaciones demasiado elevadas y después se modificará el término derivativo para que el transitorio mejore y para que aumente la velocidad de respuesta, y por último se modificara el termino integrativo para mejorar el error en el estado estable y así el sistema pase de ser críticamente estable a simplemente estable.

Por lo tanto se desarrolló la tabla 52:

Tabla 52 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico con medición por visión artificial.
Autoría propia

MÉTODO HEURÍSTICO				
	Kp	Ki	Kd	Resultado
Valores iniciales	0	0	0	-
Ajuste 1	1	-	-	Mejoro
Ajuste 2	2	-	-	Mejoro
Ajuste 3	2,5	-	-	Malo
Ajuste 4	1,7	-	-	Bueno
Ajuste 5	-	-	8000	Malo
Ajuste 6	-	-	15000	Mejoro
Ajuste 7	-	-	18000	Bueno
Ajuste 7	-	0,1	-	Malo
Ajuste 7	-	0,06	-	Mejoro
Ajuste 8	-	0,054	-	Bueno
Valores finales	1,7	0,054	18000	PID

Siguiendo esta estrategia se llega a la conclusión de que la mejor combinación de parámetros obtenida ha sido $K_p = 1.7$, $K_i = 0.054$ y $K_d = 18000$. Para poder observar los resultados de este controlador, se debe ejecutar el programa de Arduino para que se cargue en la placa y luego el de Matlab para la medición de la distancia, como resultado con un set point de 18 cm se obtiene la siguiente figura:

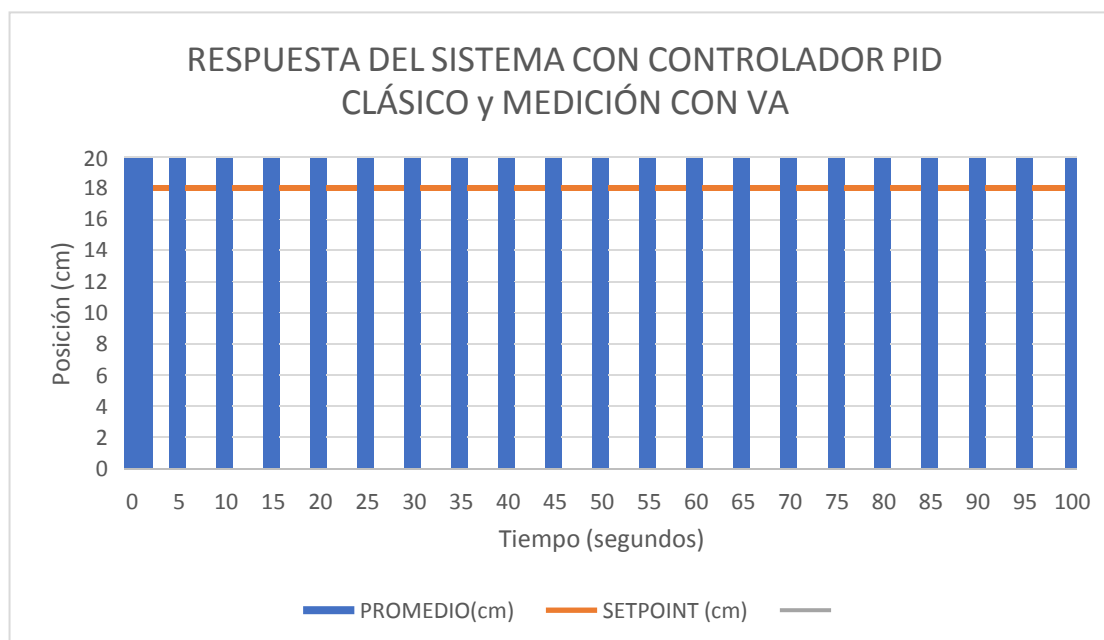


Figura 460 Respuesta del sistema con controlador PID Y VA. Autoría propia

12.4. CONTROL PID EN CASCADA DE LA PLANTA REAL CON VISIÓN ARTIFICIAL

Con el objetivo de poder tener una realimentación del valor real del ángulo que forman la manivela respecto con el punto de partida del Smart servo (un valor de cero) en cada instante de muestreo, se hará uso de un sensor de ángulo. Con esta medición, se formará, junto con el control PID implementado en el apartado anterior, lo que se conoce como un control en cascada.



Figura 461 Posición angular de la manivela con PID en cascada . Autoría propia

En cuanto a la implementación en código de este controlador, la estructura a seguir es muy parecida a la que se usó para el control PID con visión artificial. La diferencia recae en el hecho de que ahora son tres las tareas a llevar a cabo por lo que el reparto del tiempo en el ejecutivo cíclico se complica. En este caso, la tarea más rápida y que, por tanto, deberá realizarse en cada instante de muestreo es el control secundario, es decir, la lectura del ángulo, y así obtener la acción de control y enviarla al actuador, y la medición de la posición del carro se hará como en el apartado anterior mediante el software Matlab (código [anexo 10](#)).

En el siguiente diagrama de flujo (código [anexo 5](#)) se puede observar cómo es el planteamiento del código para el control PID en cascada con visión artificial.

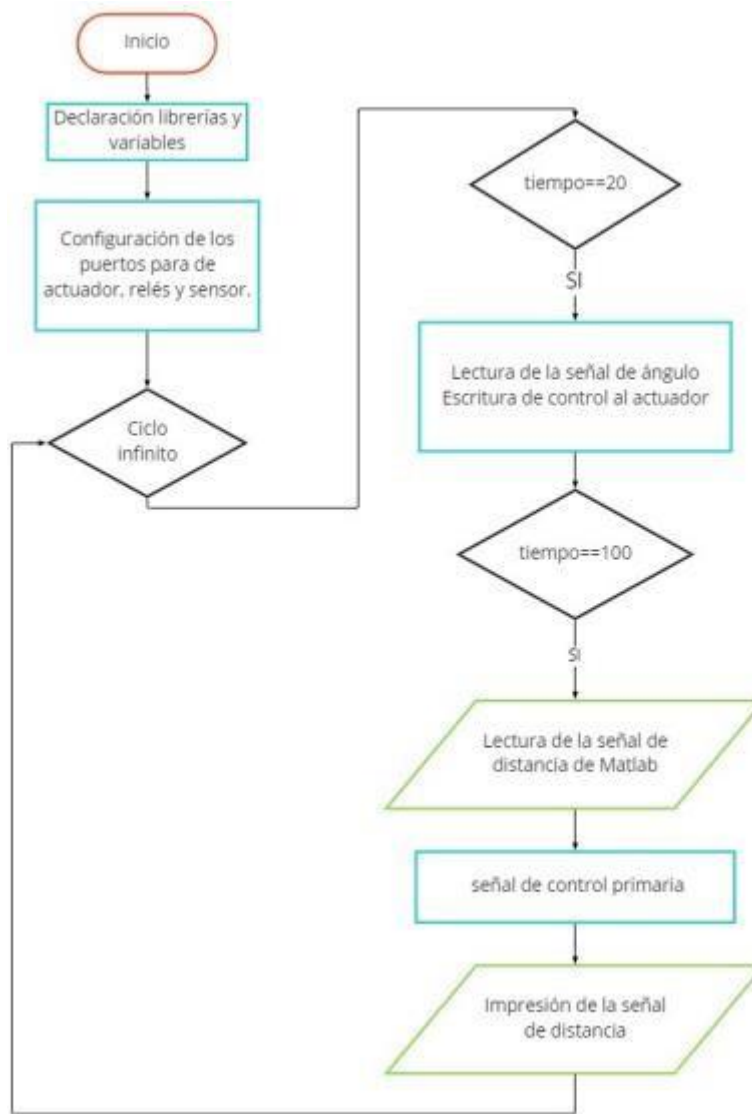


Figura 462 Diagrama de flujo de código de controlador PID en cascada con VA. Autoría propia

Tras esto, se deberá realizar el control primario, que consiste en calcular el valor de la posición tal y como se hizo en el apartado anterior. Esta tarea se realizará cinco veces más lenta que el control secundario, es decir, cada vez que el contador sea múltiplo de 5.

Se pasa a continuación al diseño de los parámetros de ambos controladores. Como se sabe que el controlador primario ya ha funcionado en el apartado anterior, se parte de estos valores para calcular los valores óptimos del controlador secundario, que deben ser tal que se alcancen las posiciones angulares requeridas por el controlador primario lo suficientemente rápido, pero sin que llegue a sobre oscilar o

a oscilar de forma mantenida en el tiempo. Cabe destacar que el término derivativo se utiliza para mejorar el régimen transitorio, pero que al ir multiplicado por la derivada del error (en realidad por una aproximación de esta), puede provocar que se vea en gran medida aumentado las oscilaciones, por lo que su valor deberá ser bajo. El término integral se usará, definitivamente, para conseguir un error en régimen permanente nulo ante entradas en escalón. Finalmente, con los valores del control secundario ya fijados, se deberán retocar los del control primario para intentar llegar a la mejor respuesta posible.

Por lo tanto se desarrolló la tabla 53:

Tabla 53 Tabla ensayo y error para controlador PID clásico en cascada con medición por visión artificial. Autoría propia

MÉTODO HEURÍSTICO							
	Kp_e	Ki_e	Kd_e	Kp_i	Ki_i	Kd_i	Resultado
Valores iniciales	1,7	0,054	18000	0	0	0	-
Ajuste 1	-	-	-	2	-	-	Malo
Ajuste 2	-	-	-	5	-	-	Mejoro
Ajuste 3	1	-	-	-	-	-	Malo
Ajuste 4	4	-	-	-	-	-	Mejoro
Ajuste 5	-	-	-	9	-	-	Mejoro
Ajuste 6	5,4	-	-	-	-	-	Bueno
Ajuste 7	-	-	10000	-	-	-	Malo
Ajuste 8	-	-	4200	-	-	-	Mejoro
Ajuste 9	-	-	-	-	-	1000	Mejoro
Ajuste 10	-	-	-	-	-	2500	Bueno
Ajuste 11	-	-	-	-	0,1	-	Malo
Ajuste 12	-	-	-	-	0,2	-	Malo
Ajuste 13	-	-	-	-	0,08	-	Mejoro
Ajuste 14	-	-	-	-	0,04	-	Mejoro
Ajuste 15	-	-	-	-	0,02	-	Mejoro
Ajuste 16	-	-	-	-	0,012	-	Mejoro
Ajuste 17	-	0,056	-	-	-	-	Bueno
Valores finales	5,4	0,056	4200	9	0,012	2500	PID_e/PID_i

Con todo, los parámetros elegidos se resumen en la tabla 54.

Tabla 54 Parámetros del control PID en cascada con VA. Autoría propia

Parámetro	Control primario	Control secundario
Kp	5.4	9
Ki	0.056	0.012
Kd	4200	2500

Con los parámetros de los controladores ya fijados y el código del programa elaborado, se está en condiciones de mostrar los resultados obtenidos en forma de

representación gráfica. Por lo tanto, con un set point de 18 cm se obtiene la siguiente respuesta:

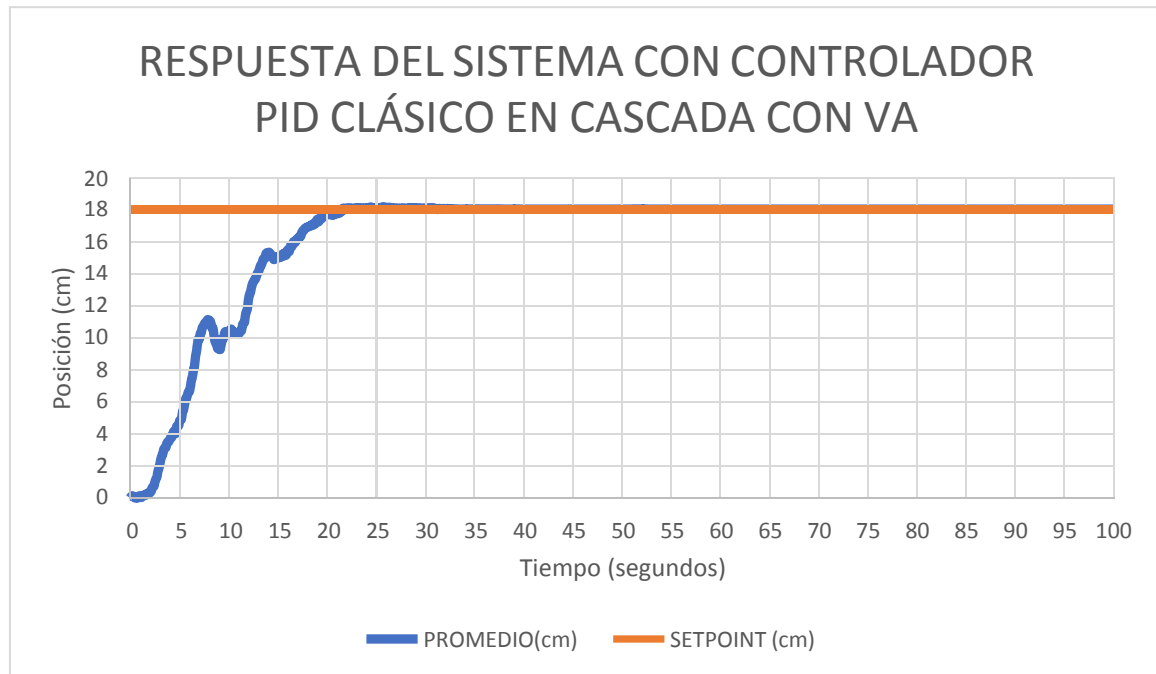


Figura 463 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada y VA. Autoría propia

Como se puede observar en la figura 463, en el caso del control, en el que se pretende que la posición de la bola alcance la referencia solicitada, se observa en primer lugar que el sistema responde un poco más lento en el régimen transitorio teniendo ciertas sobre oscilaciones, pero en el régimen estable para llegar a la consigna es rápido en comparación con el PID clásico VA con un error de 0,266573696 %.

12.5. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA CONTROLADOR PID CLÁSICO Y PID EN CASCADA CON VA

Diseño del proceso de validación

Para el proceso de validación se tuvieron en cuenta los márgenes de respuesta del sistema ante los diferentes tipos de control con VA (PID clásico y PID en cascada) para el régimen transitorio, así como también un estudio estadístico de los datos obtenidos para el régimen estable.

Los márgenes de respuesta en el régimen transitorio tenidos en cuenta fueron tiempo de retardo (t_d), tiempo de levantamiento (t_r), máximo pico (M_p), tiempo pico

(t_p) y tiempo de establecimiento (t_s) ya que es un sistema con entrada de tipo escalón unitario. Estos 5 márgenes se definen como:

- Tiempo de retardo: tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez al 50% del valor final.
- Tiempo de levantamiento: tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%.
- Máximo pico: Es el valor pico máximo de la curva de respuesta
- Tiempo pico: Es el tiempo que tarda el sistema en llegar al máximo pico
- Tiempo de establecimiento: tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

El estudio estadístico se realizó con el fin de conocer la repetibilidad del sistema y la repetibilidad de respuesta ante los diferentes controladores, así como también detallar más a fondo la respuesta en estado estable, mediante indicadores como lo son la desviación estándar y el error promedio. En general se hicieron 6 experimentos, los cuales se señalan a continuación:

- Respuesta del sistema con un control PID clásico con VA en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID clásico con VA ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID clásico con VA ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada con VA en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada con VA ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID en cascada con VA ante una perturbación.

El estudio estadístico de todos los experimentos anteriores se realizó en base a la siguiente plantilla de ficha técnica muestral (tabla 55).

Tabla 55 Plantilla de la ficha técnica muestral con medición VA

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos

Procedimientos de muestreo	Establecer el procedimiento para el muestreo del experimento.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

12.5.1.Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 2 métodos de control.

12.5.1.1. Puesta del sistema de control PID clásico con VA en la planta real

- Condiciones normales

Para la toma de datos se opta por usar el software de Matlab, por tal razón se realiza un pequeño programa para este tipo de control, teniendo en cuenta un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. El código se puede ver en el [anexo 10](#).

El proceso de la toma de datos se inicia en Matlab y por medio de Arduino se le solicita al controlador llevar el sistema a un valor de 18 cm de posición en la barra y se captura un total de 1000 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato en cm por visión artificial desde el software Matlab, el dato ya en centímetros se envía al microcontrolador Arduino y se introduce al sumador para realizar el respectivo cálculo del error y posteriormente los diferentes cálculos de los parámetros del controlador PID. Realizado esto se emite una señal que es introducida por medio de comunicación UART en el elemento final de control.

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que por medio de una señal aleatoria con un valor máximo de 1% del valor máximo de lectura se simula ruido, y este se le introduce a la señal de medición dada por visión artificial en cm.

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues en el instante de tiempo 50 se introduce una perturbación negativa la cual genera un pico de 5 cm en promedio y en el instante de tiempo 76 es retirada en su mayoría del sistema.

12.5.1.2. Puesta del sistema de control PID en cascada con VA en la planta real

- Condiciones normales

Para la toma de datos se opta por usar el software de Matlab, por tal razón se realiza un pequeño programa para este tipo de control, teniendo en cuenta un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. El código se puede ver en el [anexo 10](#).

El proceso de la toma de datos se inicia en Matlab y por medio de Arduino se le solicita al controlador llevar el sistema a un valor de 18 cm de posición en la barra y se captura un total de 1000 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato en cm por visión artificial desde el software Matlab, el dato ya en centímetros se envía a un lazo de control interno el cual será 5 veces más rápido que el externo; el dato mencionado anteriormente se introduce al sumador interno para realizar el respectivo cálculo del error y posteriormente los diferentes cálculos de los parámetros del controlador PID obteniendo el controlador PID interno por medio del microcontrolador Arduino y este realiza la escritura en el servomotor por medio de comunicación UART.

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en que por medio de una señal aleatoria con un valor máximo de 5% del

valor máximo de lectura se simula ruido, y este se le introduce a la señal de medición dada por visión artificial en cm.

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues en el instante de tiempo 40 se introduce una perturbación negativa la cual genera un pico de 5 cm en promedio y en el instante de tiempo 50 es retirada en su mayoría del sistema.

12.5.2. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico con VA

12.5.2.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID con VA

- Condiciones normales

En la figura 464 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

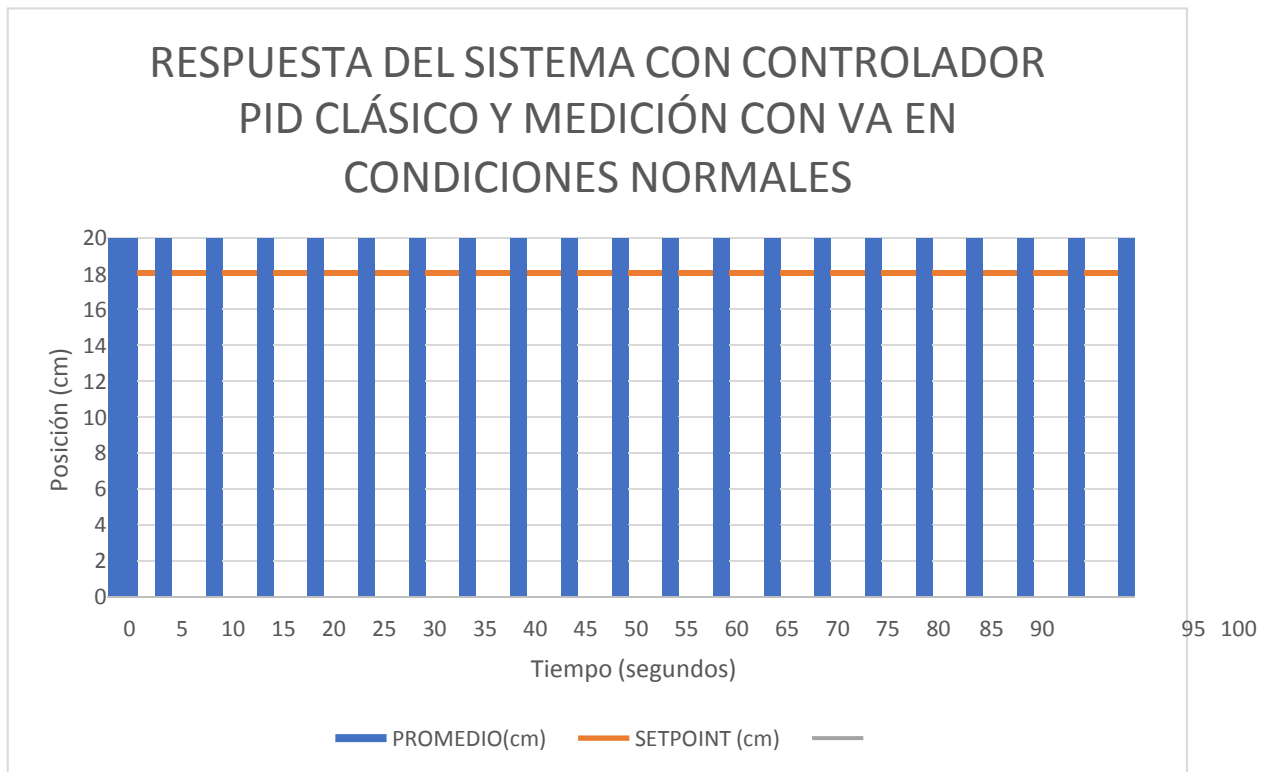


Figura 464 Respuesta del sistema con controlador PID clásico y VA en condiciones normales. Autoría propia

Valor final (VF) = **18,1462 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.0731 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **1,120345811segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.33158 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 1,403770303 segundos

10% de VF = 1.81462 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 0,790235305 segundos

Tr = 1.40377 – 0.790235 = **0.613534998 segundos**

➤ Mp:

Mp = (19,2146979- 18,1462) cm

Mp = **1.0684979 cm**

➤ T_p :

$t_p = 4.8$ segundos

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.362924 cm

De esta manera el rango es 18.509124 para el límite superior y 17.783276 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular se determina que t_s es de **41** segundos.

En la figura 465 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

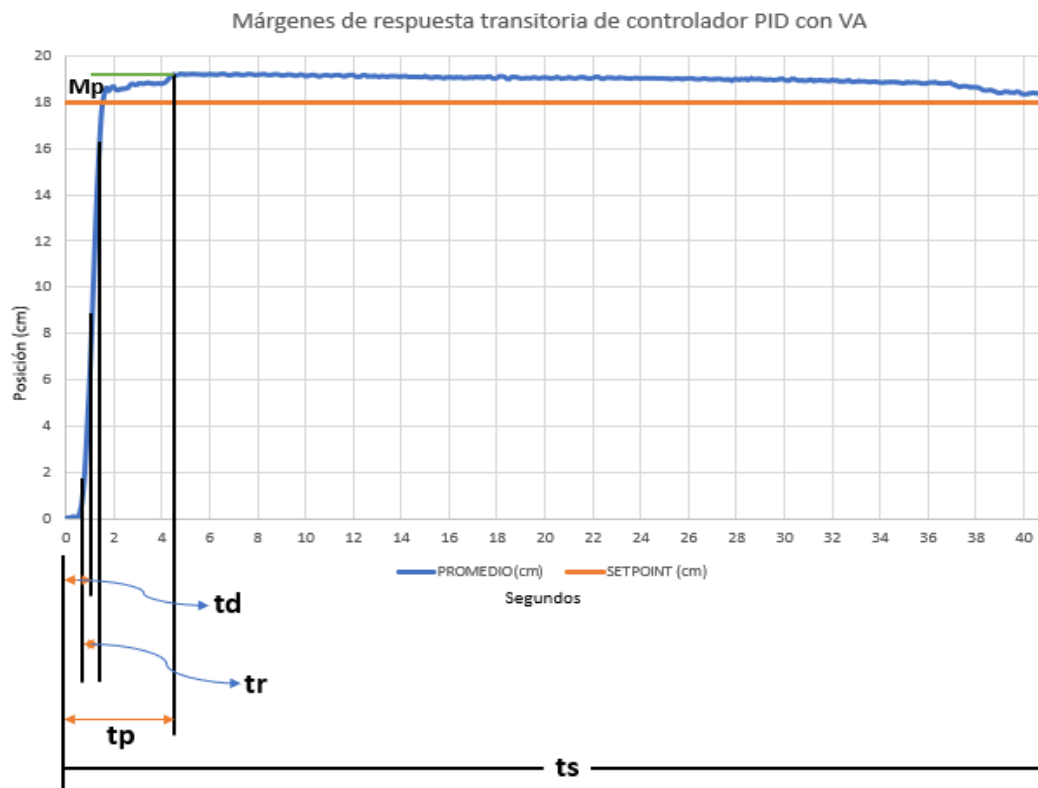


Figura 465 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con VA. Autoría propia

Ruido

En la figura 466 se observa la respuesta general del sistema ante ruido

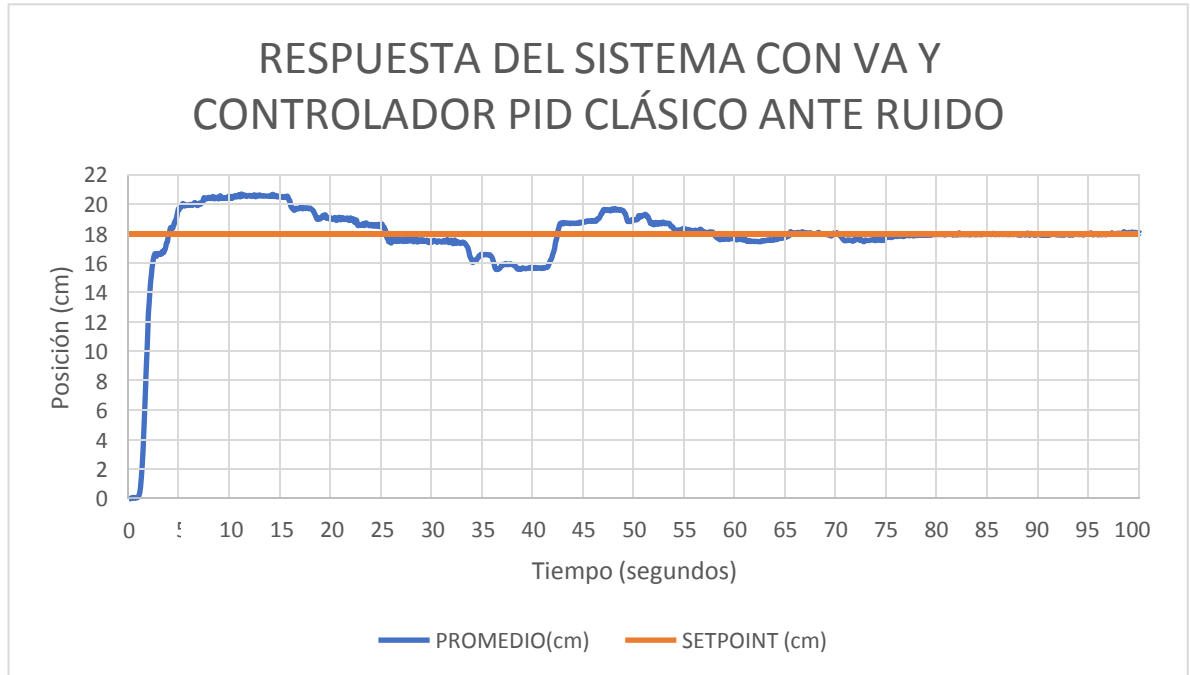


Figura 466 Respuesta del sistema con controlador PID y VA ante ruido. Autoría propia

Valor final (VF) = **17,9819 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 8.99095 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **1,713120171segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.18371 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 2,38104341 segundos

10% de VF = 1.79819 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 1,251953185 segundos

Tr = 2.381 – 1.25195 = **1.12909 segundos**

➤ Mp:

$M_p = (20,64698751 - 17,9819) \text{ cm}$

$M_p = 2.66508751 \text{ cm}$

➤ T_p :

$t_p = 12.4 \text{ segundos}$

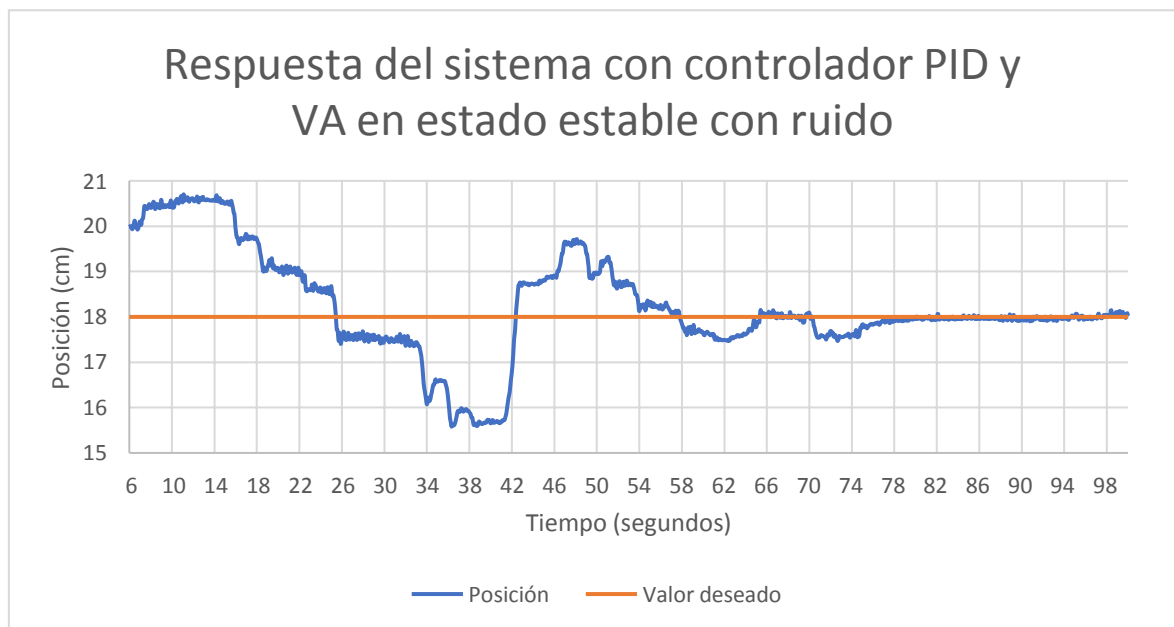
➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.359638 cm

De esta manera el rango es 18.341538 para el límite superior y 17.622262 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular guiado por la figura 467 se determina que t_s es de **80 segundos**.



**Figura 467 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID y VA con ruido.
Autoría propia**

En la figura 468 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

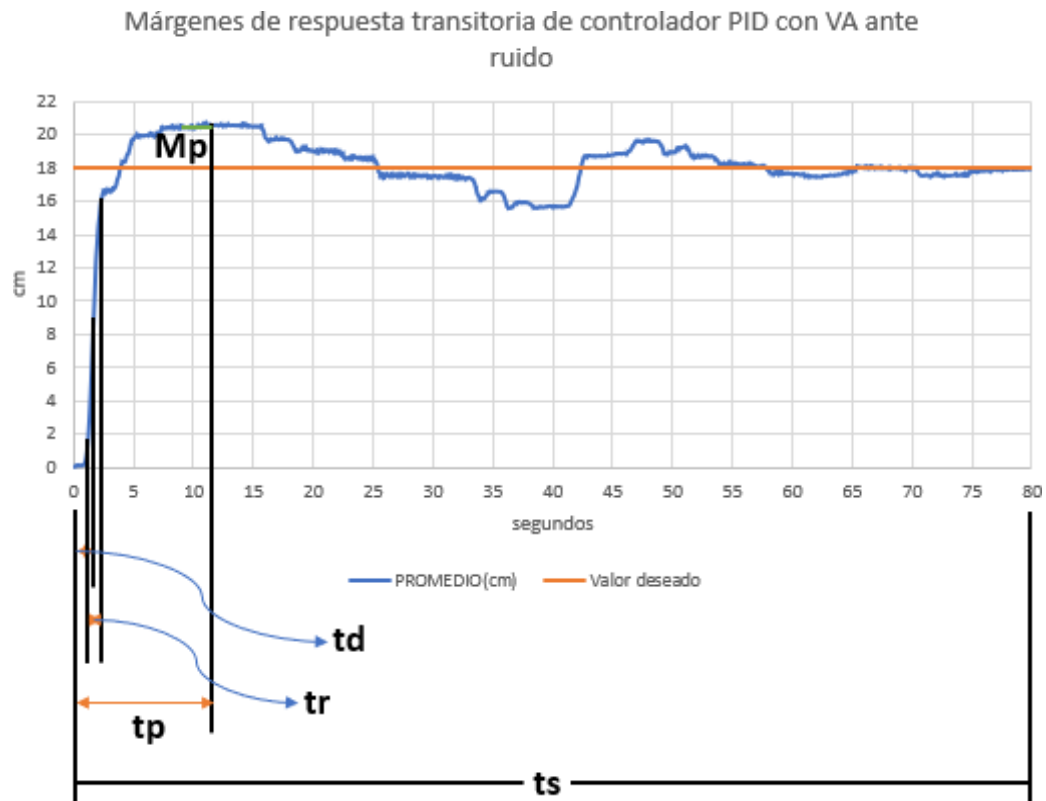


Figura 468 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID y VA con ruido. Autoría propia

12.5.2.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID con VA

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control PID con VA en condiciones normales se observa en la tabla 56.

Tabla 56 Ficha técnica muestral experimento control PID con VA en condiciones normales

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos

Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID con VA durante 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 469.

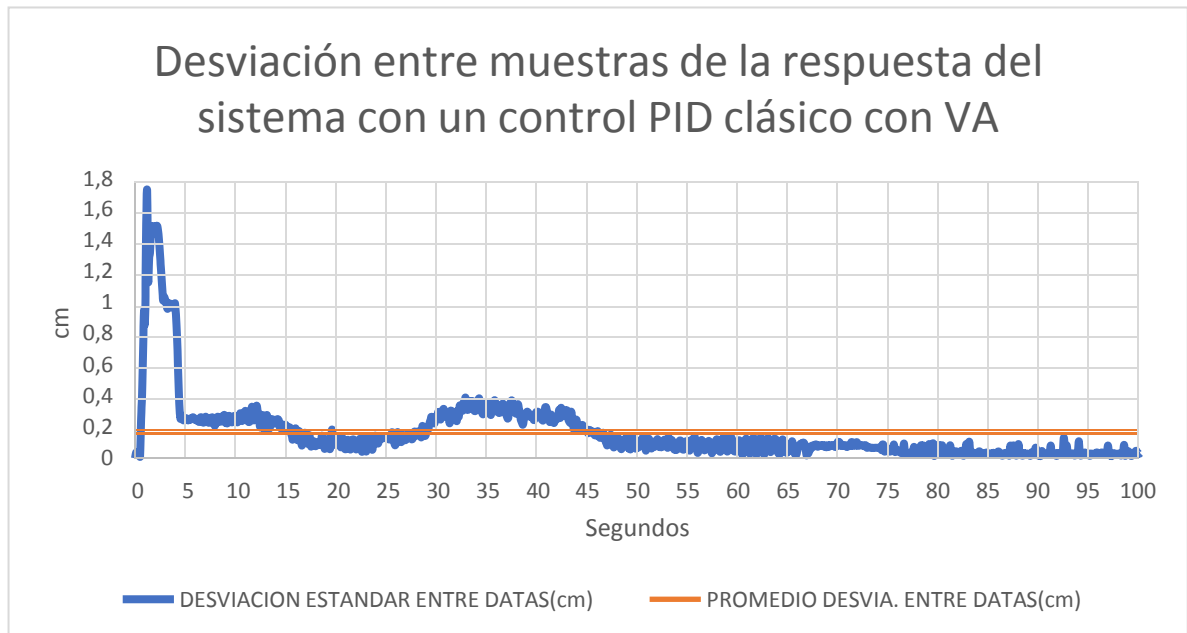


Figura 469 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID y VA.
Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,166232486886051$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 41 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 470, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,065255002$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,065255002$ cm.

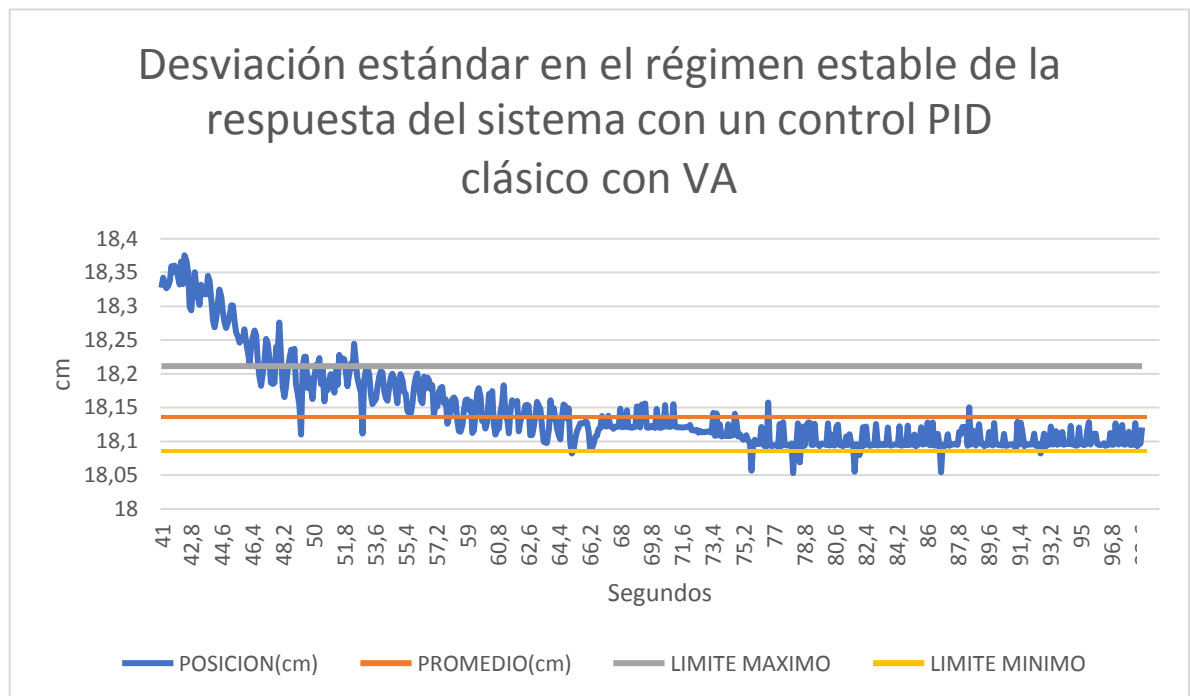


Figura 470 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico con VA. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 471, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,812189247 %.

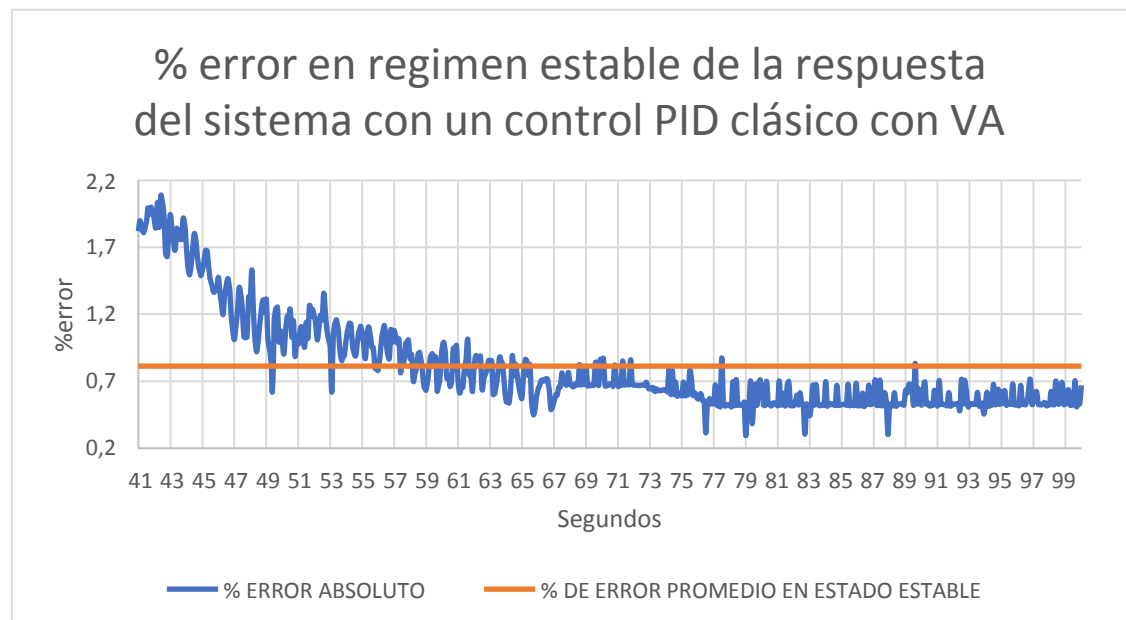


Figura 471 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico. Autoría propia

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control PID clásico ante ruido con VA se observa en la tabla 57.

Tabla 57 Ficha técnica control PID con VA ante ruido

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del 1% del valor máximo de lectura por VA.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 472.

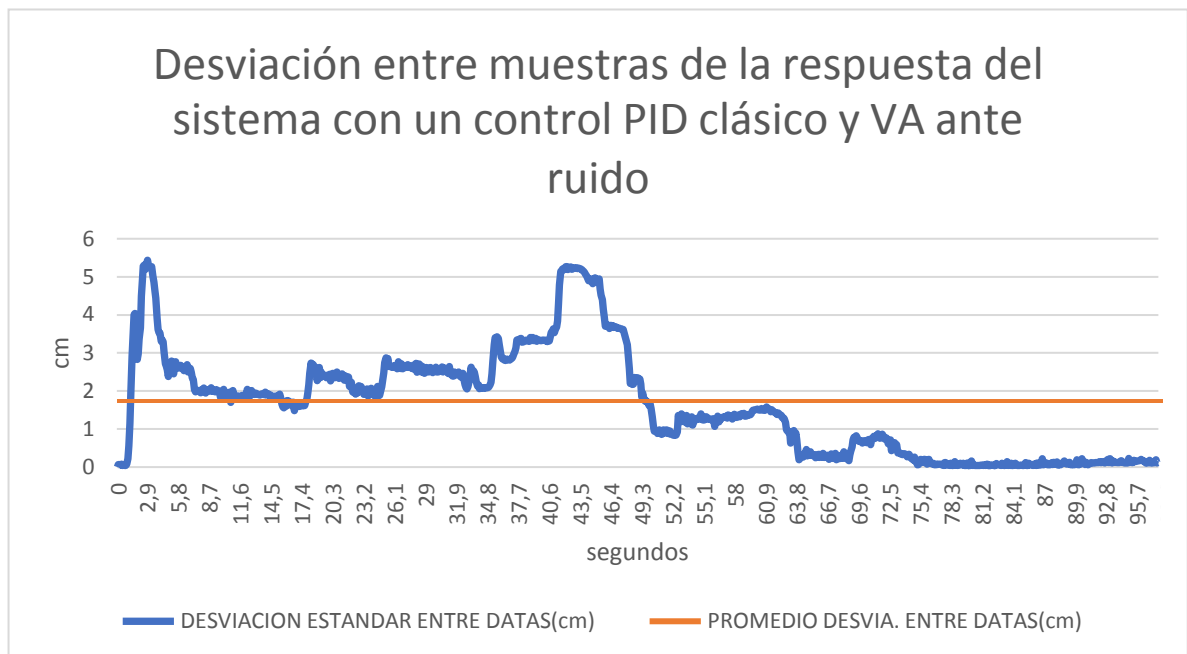


Figura 472 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 1,640553638$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 34 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 473, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,042252865$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,042252865$ cm.

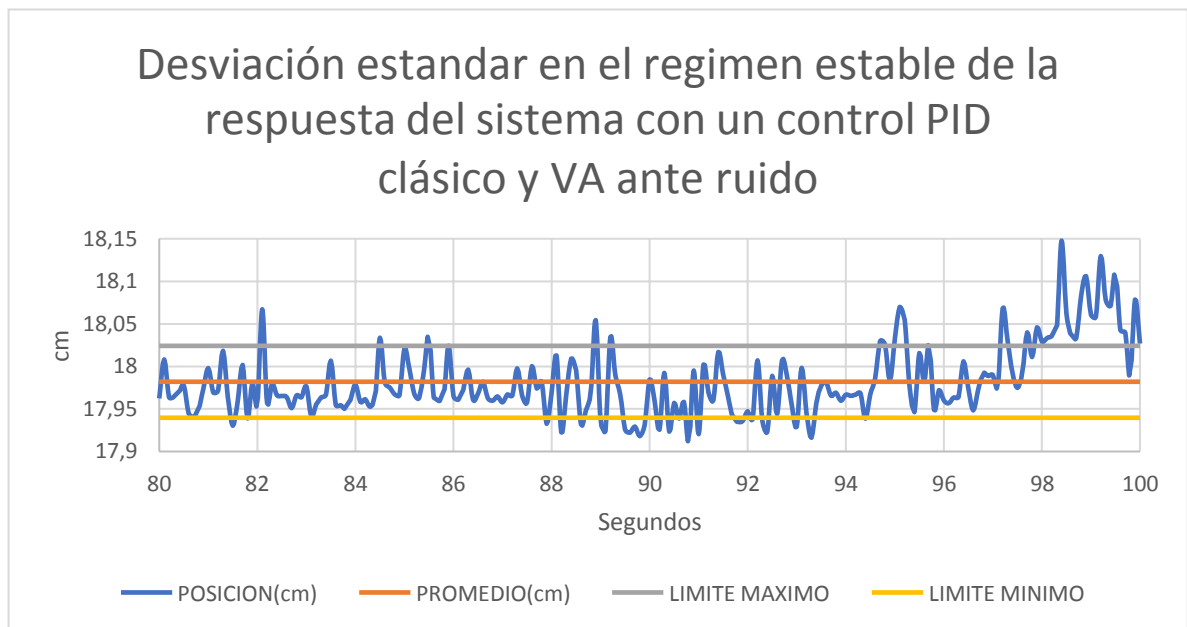


Figura 473 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 474, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,217323277 %.

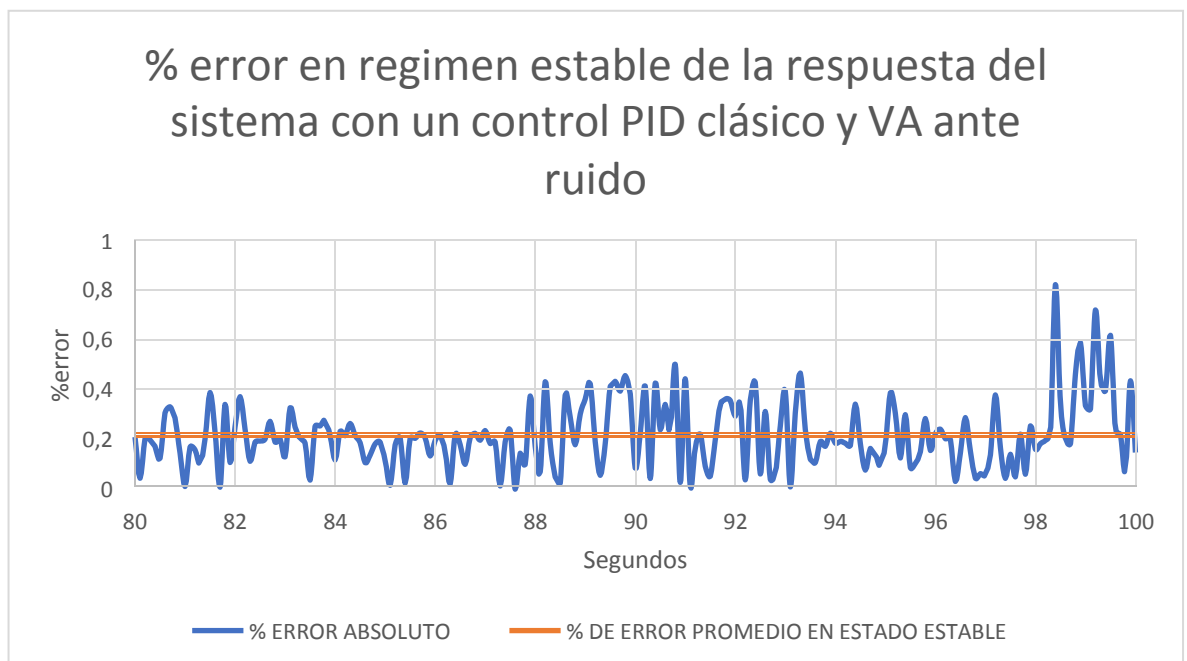


Figura 474 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico y VA ante ruido. Autoría propia

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control PID clásico ante perturbación se observa en la tabla 58.

Tabla 58 Ficha técnica control PID con VA ante perturbación

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 5 cm en el instante de tiempo de 50 segundos y 26 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestrales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

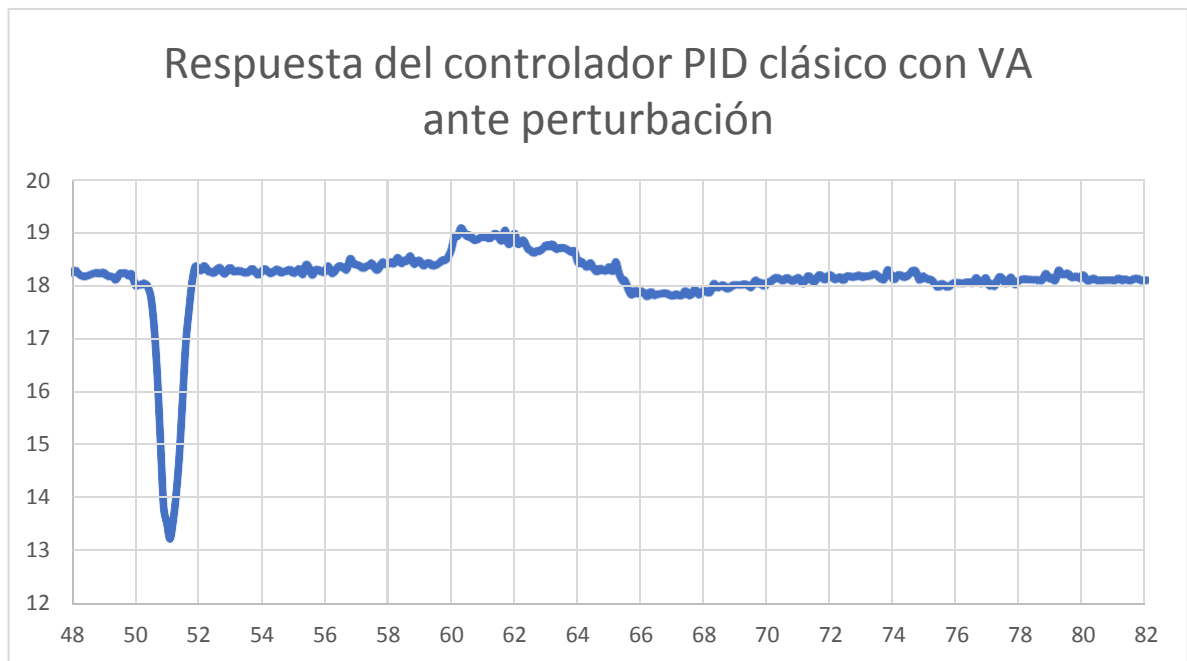


Figura 475 Respuesta del controlador PID clásico con VA ante perturbación. Autoría propia

Como se observa en la figura 475 en el instante de tiempo 50 (aproximadamente) se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 5 cm llevando la posición del carro a un valor de 13,22 cm y oscila en el sistema durante 26 segundos, en este transcurso de tiempo el controlador solo logra reducir la perturbación un 97% llevando el sistema a un valor de 18,09 cm por lo que en definitiva logro compensar casi todo el valor de la perturbación.

12.5.3. Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID clásico en cascada con VA

12.5.3.1. Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID en cascada con VA

- Condiciones normales

En la figura 476 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

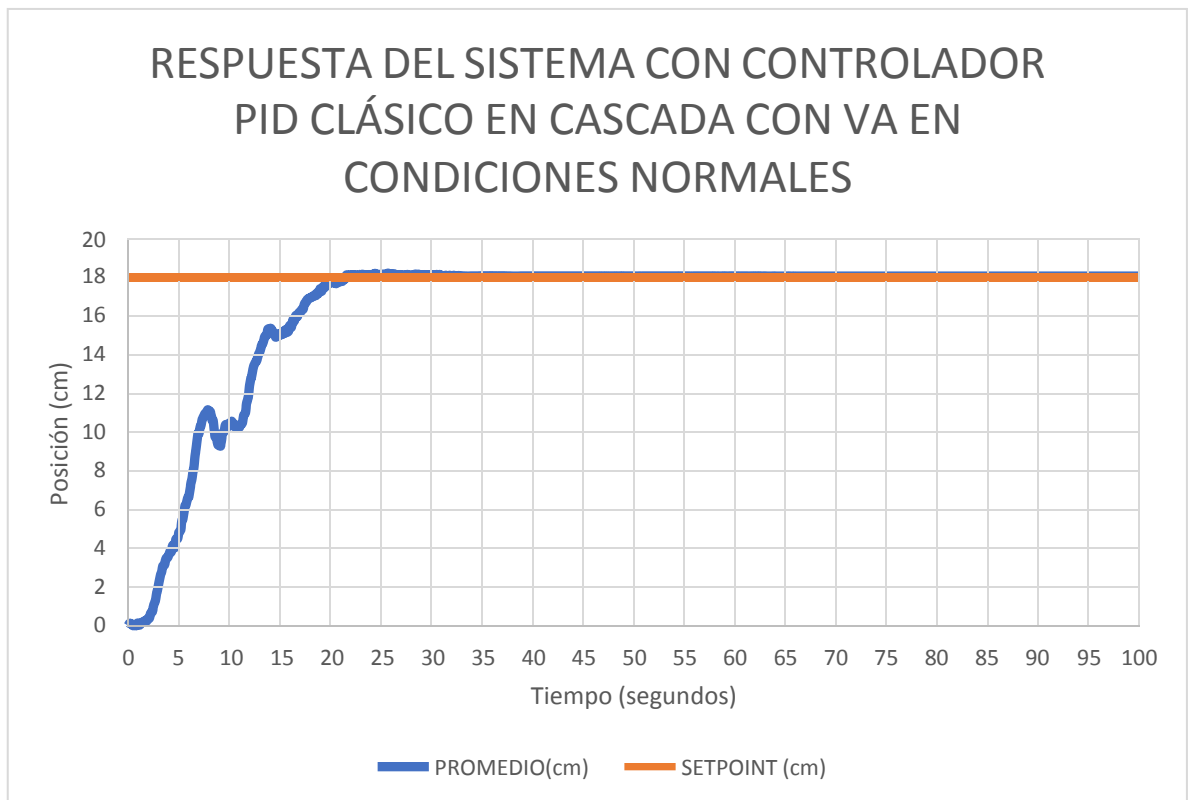


Figura 476 Respuesta del sistema con controlador PID clásico en cascada y VA en condiciones normales. Autoría propia

Valor final (VF) = **18,0480 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.024 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **6,677993119 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.2432 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 17,0805007 segundos

10% de VF = 1.8048 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 2,873443668 segundos

$tr = 17,0805007 - 2,873443668 = \mathbf{14.20705703 \text{ segundos}}$

➤ Mp:

$Mp = 18.190322 - 18.048$

$M_p = 0.142322 \text{ cm}$

➤ T_p :

$t_p = 25.7 \text{ segundos}$

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.36096 cm

De esta manera el rango es 18.40896 para el límite superior y 17.68704 para el límite inferior. Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular se determina que t_s es de **27** segundos.

En la figura 477 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

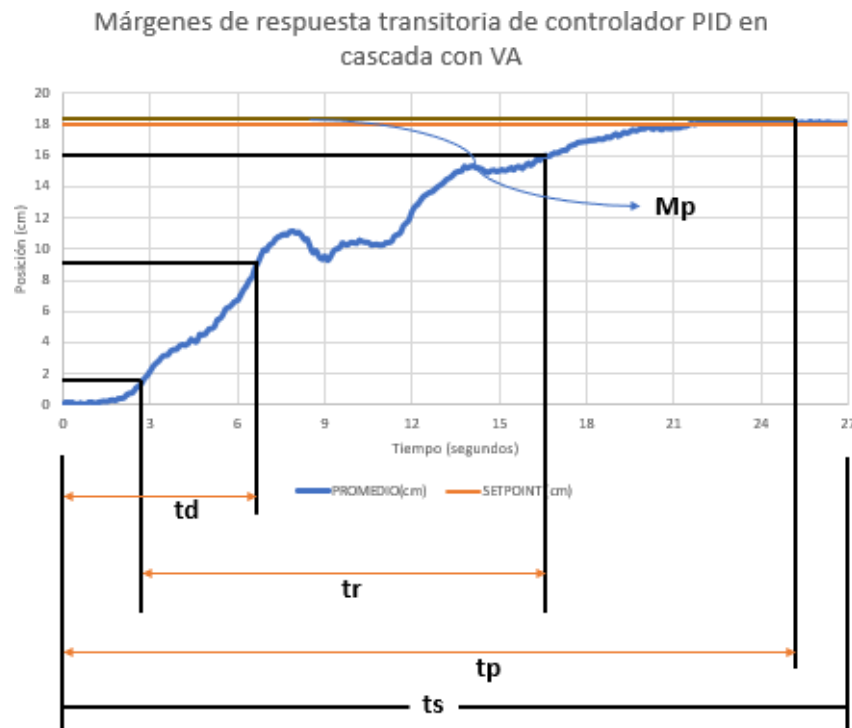


Figura 477 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con VA.
Autoría propia

- Ruido

En la figura 478 se observa la respuesta general del sistema ante ruido



Figura 478 Respuesta del sistema con controlador PID en cascada y VA ante ruido. Autoría propia

Valor final (VF) = **18.0581 cm**

➤ Td:

50 % de VF = 9.02905 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) = **6.27758743 segundos**

➤ Tr:

90% de VF = 16.25229 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) = 16.380963 segundos

10% de VF = 1.80581 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) = 3.27735259 segundos

$Tr = 16.380963 - 3.27735259 = \mathbf{13.10361041 \text{ segundos}}$

➤ M_p :

$M_p = 18.59447914 - 18.0581$

$M_p = \mathbf{0.53637914 \text{ cm}}$

➤ T_p :

$t_p = \mathbf{32.9 \text{ segundos}}$

➤ T_s :

Para el cálculo de t_s se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF = 0.361162 cm

De esta manera el rango es 18.419262 para el límite superior y 17.696938 para el límite inferior

Luego de realizar el cálculo del rango, se tiene en cuenta para una evaluación grafica en la curva de la respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio, para este caso en particular guiado por la figura 479 se determina que t_s es de **50** segundos.

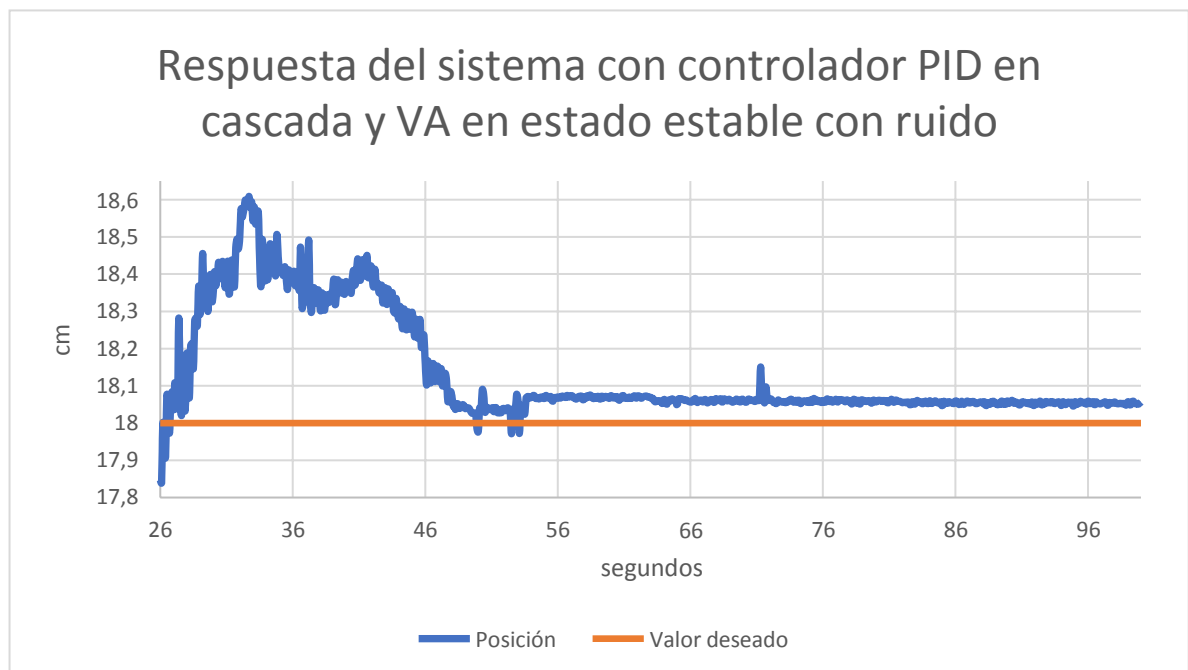


Figura 479 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID y VA ante ruido.
Autoría propia

En la figura 480 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

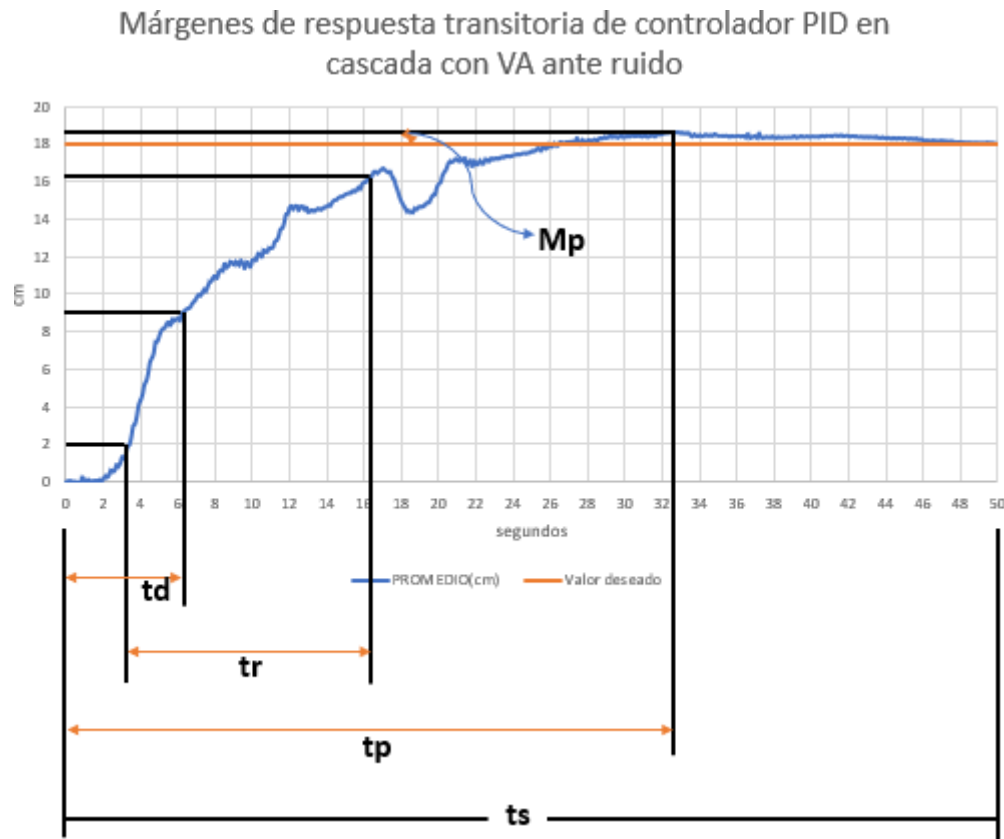


Figura 480 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID en cascada con ruido.
Autoría propia

12.5.3.2. Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID clásico en cascada

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control PID en cascada con VA en condiciones normales se observa en la tabla 59

Tabla 59 Ficha técnica muestral experimento control PID en cascada con VA en condiciones normales

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada con VA de intervalo de 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 481.

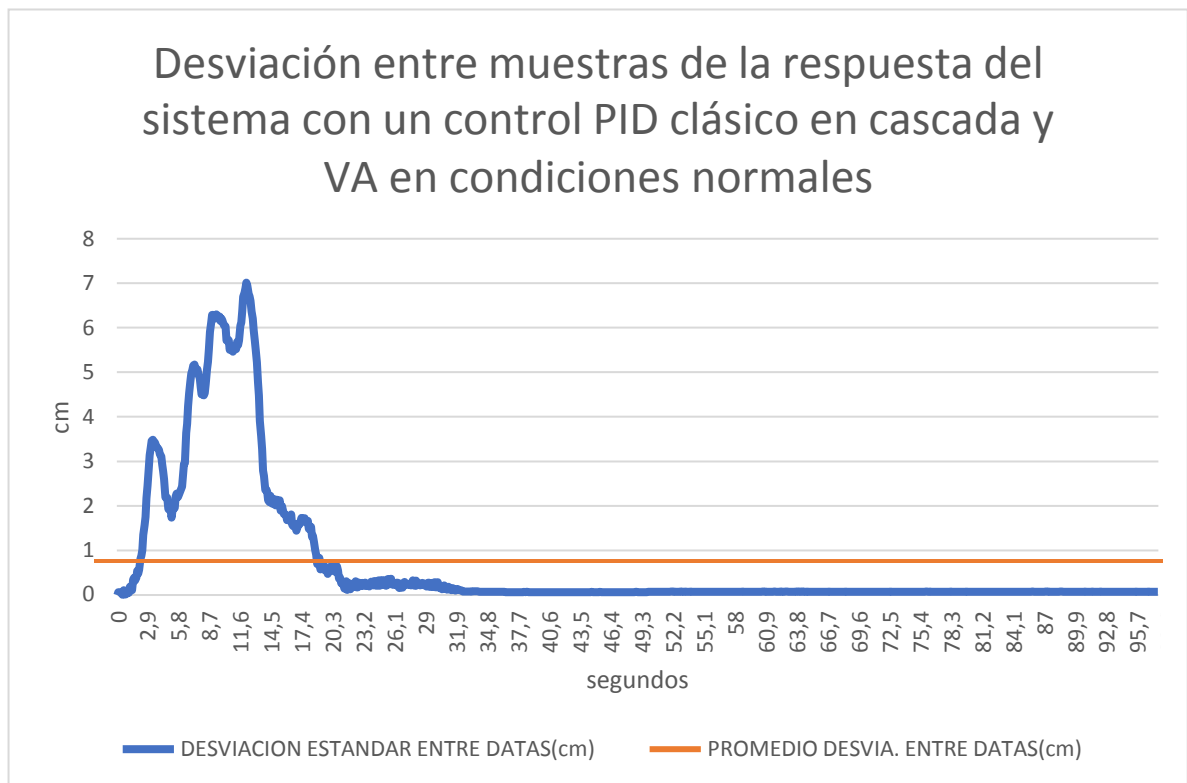


Figura 481 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID en cascada y VA en condiciones normales. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,702802165$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 27 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 482, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,012631323$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,012631323$ cm.

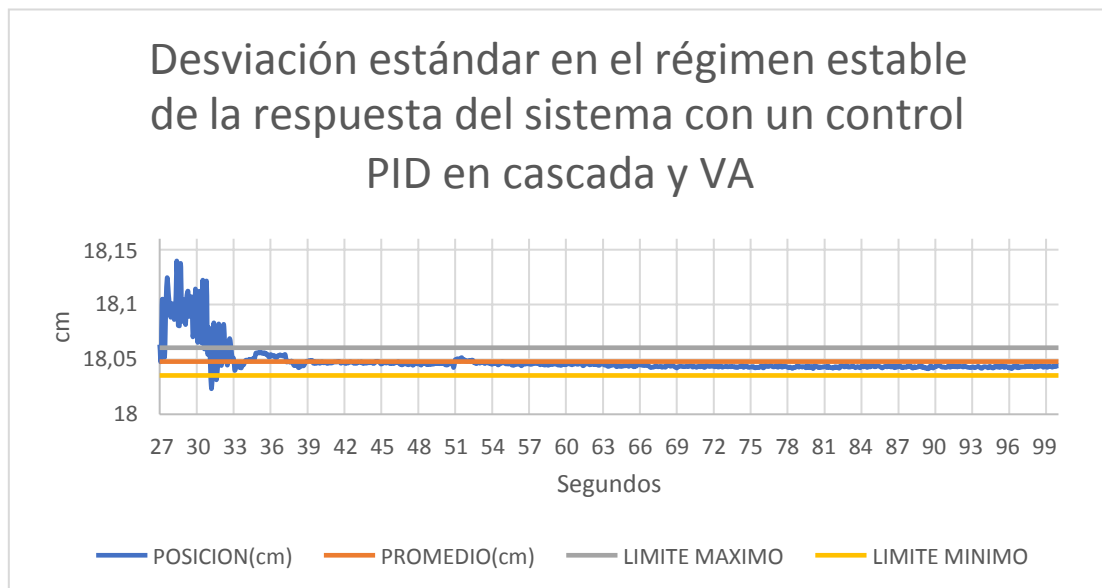


Figura 482 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada con VA. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 483, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,266573696 %.

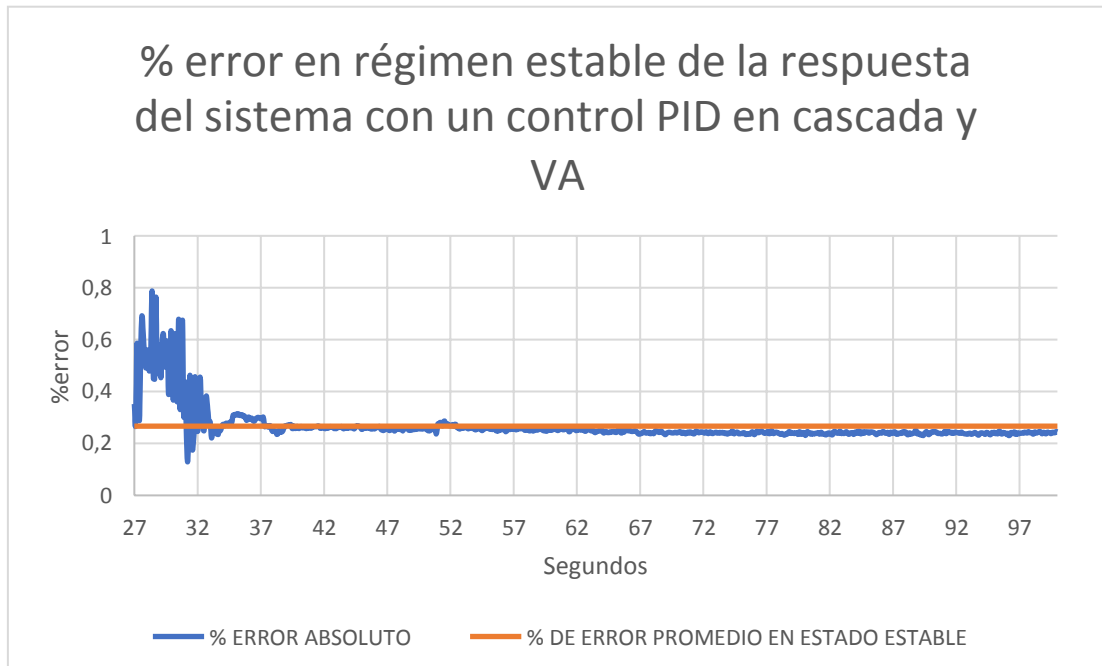


Figura 483 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA. Autoría propia

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control PID clásico en cascada con VA ante ruido se observa en la tabla 60.

Tabla 60 Ficha técnica control PID en cascada con VA ante ruido

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada con VA durante 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del 5% del valor máximo de lectura del puerto analógico.
Estimadores muestrales	Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo. Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema. Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema. Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 484.

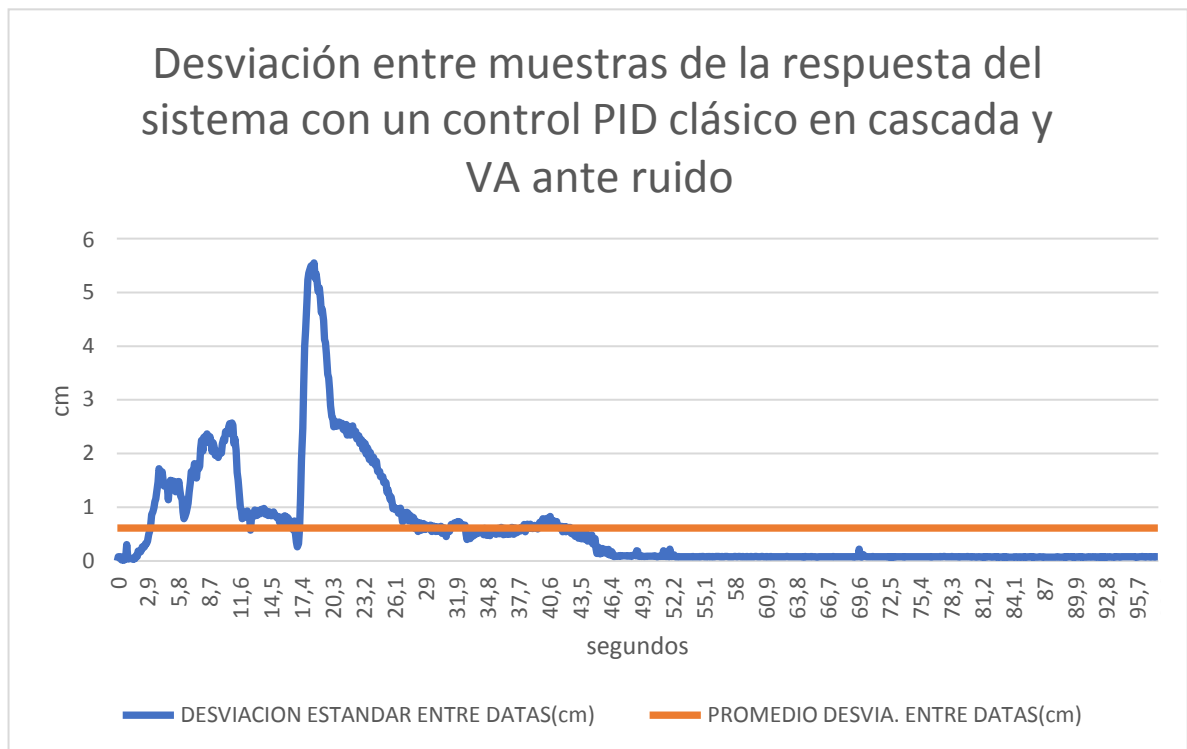


Figura 484 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia

Teniendo un promedio de desviación de $\pm 0,61342239$ cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después de los 50 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 485, donde el promedio de dicha desviación es de $\pm 0,003102705$ cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia $\pm 0,003102705$ cm.

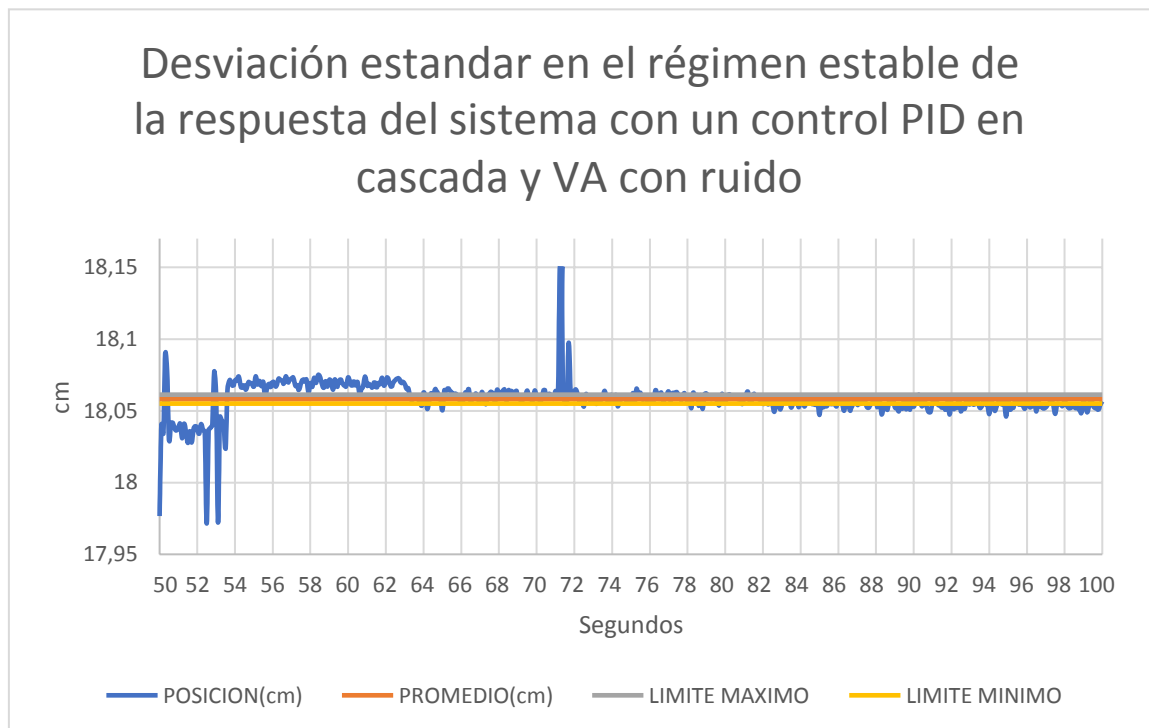


Figura 485 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia

El error en régimen estable se observa en la figura 486, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 18 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0,304646838 %.

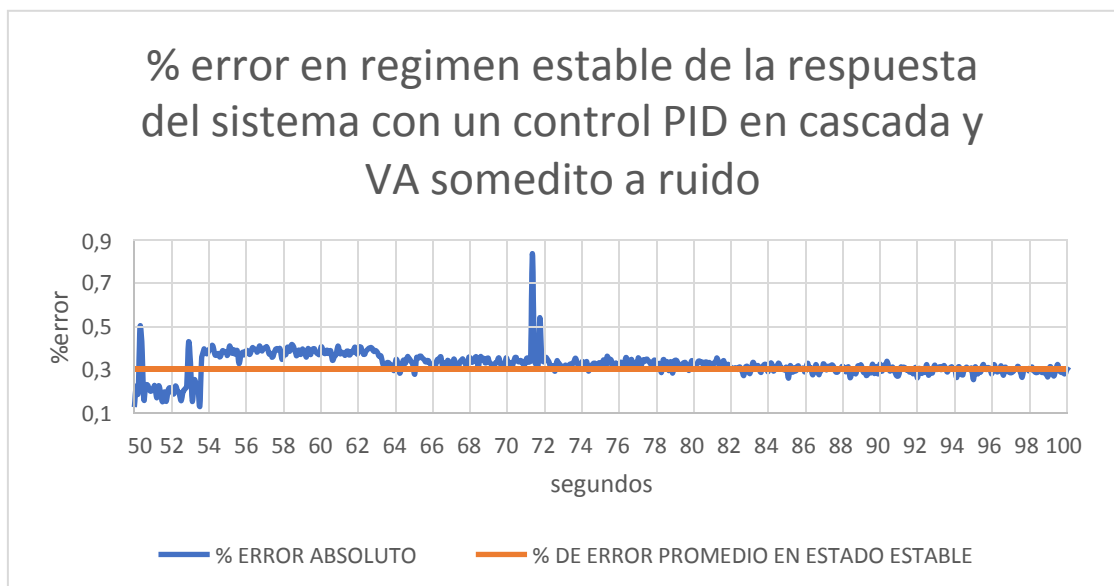


Figura 486 error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID clásico en cascada y VA ante ruido. Autoría propia

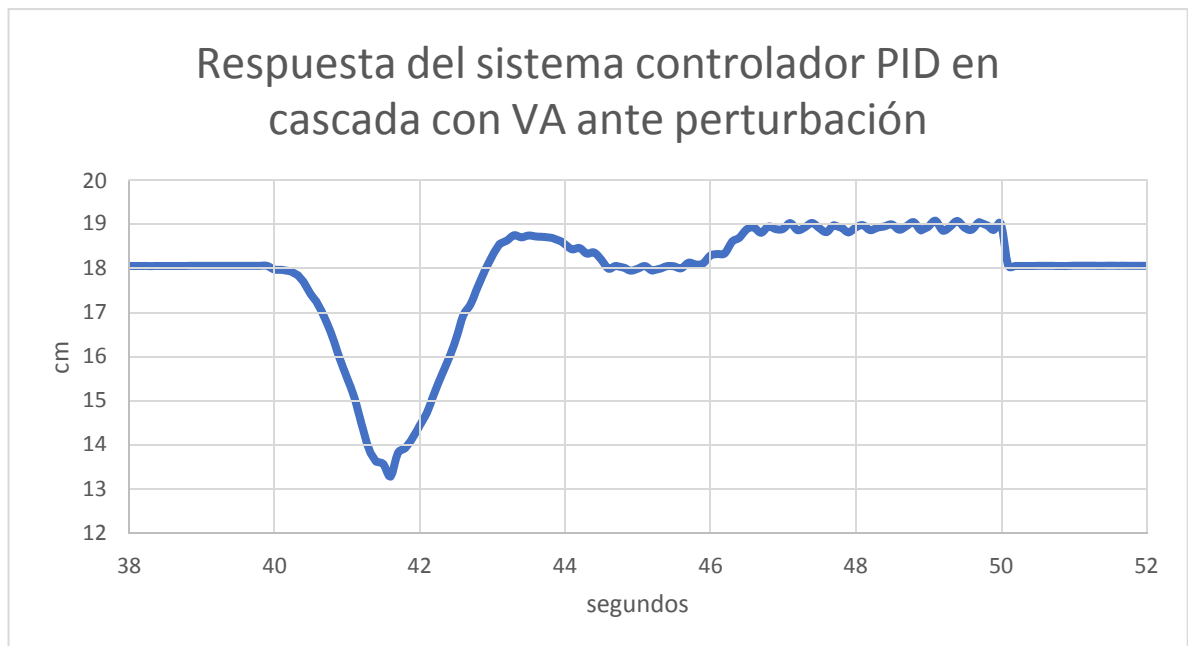
- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control PID clásico en cascada con VA ante perturbación se observa en la tabla 61.

Tabla 61 Ficha técnica control PID en cascada con VA ante perturbación

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta de control de posición de un carro en una barra.
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	1000 datos
Procedimientos de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 18 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID en cascada con VA durante 100 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 5 cm en el instante de tiempo de 40 segundos y 10 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestrales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: ARAUJO, Jair. Plantilla de la ficha técnica muestral [Tabla]. Tesis. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales, 2020.



**Figura 487 Respuesta del controlador PID clásico en cascada con VA ante perturbación.
Autoría propia**

Como se observa en la figura 487 en el instante de tiempo 40 (aproximadamente) se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 5 cm llevando la posición del carro a un valor de 13.27 cm y oscila en el sistema durante 10 segundos, en este transcurso de tiempo el controlador solo logra reducir la perturbación un 99.6% llevando el sistema a un valor de 18.04 cm por lo que en definitiva logro compensar el valor de la perturbación.

13. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CONTROLADORES CON SENSOR ULTRASONICO Y CÁMARA

Los resultados de los incisos (11 y 12) anteriores se resumen en la tabla 62.

Tabla 62 Resultados generales de los experimentos con los dos tipos de medición. Autoría propia

Resultados en condiciones normales y perturbación									
C O N T R O L	Experimento	Régimen transitorio					Régimen estable		
		td	tr	tp	Mp (cm)	ts	Desviación estándar en régimen estable (cm)	Punto de asentamiento (cm)	% de error promedio en régimen estable (%)
P I D	Normal	1.917	0.6713	3	23.6768	18	0.09908	18.0311	0.3441
	Ruido	1.907	0.6617	3	21.2158	34	0.10609	18.00813	0.482
PID en cascada	Normal	2.3838	1.2224	4.9	4.6474	14	0.0395	17.9966	0.05128
	Ruido	2.278	1.279	3.4	3.9134	31	0.133	18.0946	0.448
PID con VA	Normal	1.1203	0.6135	4.8	1.06849	41	0.06525	18.1462	0.8121
	Ruido	1.7131	1.129	12.4	2.665	80	0.04225	17.9819	0.2173
PID en cascada con VA	Normal	6.6779	14.207	25.7	0.14232	27	0.0126313	18.048	0.2665
	Ruido	6.277	13.1036	32.9	0.53637	50	0.0031027	18.0581	0.3046
Resultados ante perturbación									
	Estabiliza Si o No					Tiempo de respuesta a la perturbación (s)			
PID	Si					13			
PID en cascada	Si					4			
PID con VA	Si					26			
PID en cascada con VA	Si					10			

Para analizar los resultados se partió por seleccionar a los indicadores con mayor deficiencia en la respuesta tanto en el régimen transitorio como estable y partiendo de los mismos se hallaron los porcentajes de mejora de los demás respecto a dichos indicadores, haciendo uso en todos los casos de la ecuación 62.

$$\% \text{ mejora} = \frac{|\text{Indicador referencia} - \text{Indicador a evaluar}|}{\text{Indicador referencia}} \times 100 \% \quad (62)$$

Se evalúan cada uno de los indicadores y se obtiene los siguientes resultados (tabla 63):

Tabla 63 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia con los dos tipos de medición. Autoría propia

Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia										
condiciones	Régimen	Indicador	Mayor deficiencia	Valor (s)	Alta deficiencia	% de mejora	Deficiencia media	% de mejora	Menor deficiencia	% de mejora
En condiciones normales	Régimen transitorio	td	PID en cascada con VA	6.6779	PID en cascada	64.303	PID	71.293	PID con VA	83.2237
		tr	PID en cascada con VA	14.207	PID en cascada	91.3957	PID	95.2748	PID con VA	95.6817
		tp	PID en cascada con VA	25.7	PID en cascada	80.9338	PID con VA	81.3229	PID	88.3268
		Mp	PID	23.6768	PID en cascada	80.3715	PID con VA	95.487	PID en cascada con VA	99.3989
		ts	PID con VA	41	PID en cascada con VA	34.1463	PID	56.0975	PID en cascada	65.853
	Régimen estable	Desviación en estado estable	PID	0.09908	PID con VA	34.14412	PID en cascada	60.133	PID en cascada con VA	87.2514
		% error en estado estable	PID con VA	0.8121	PID	57.628	PID en cascada con VA	67.1838	PID en cascada	93.6855
Ante ruido	Régimen transitorio	td	PID en cascada con VA	6.277	PID en cascada	63.7087	PID	69.919	PID con VA	72.7083
		tr	PID en cascada con VA	13.1036	PID en cascada	90.239	PID con VA	91.384	PID	94.9502
		tp	PID en cascada con VA	32.9	PID con VA	62.31	PID en cascada	89.665	PID	90.881
		Mp	PID	21.2158	PID en cascada	81.5543	PID con VA	87.4386	PID en cascada con VA	97.4718
		ts	PID con VA	80	PID en cascada con VA	37.5	PID	57.5	PID en cascada	61.25
	Régimen estable	Desviación en estado estable	PID en cascada	0.133	PID	20.233	PID con VA	68.233	PID en cascada con VA	97.667
		% error en estado estable	PID	0.482	PID en cascada	7.0539	PID en cascada con VA	36.804	PID con VA	54.917

Lo anterior transpone los resultados entre controladores, marcando la comparación entre los controladores en condiciones normales y ante ruido. Pero también se hace necesario comparar los cambios de cada tipo de control ante el ruido, es decir, evaluar como afecto el ruido su propia dinámica. Para lo cual se calculó el porcentaje de afectación de cada control tras el efecto del ruido, donde no se considera si el cambio arroja o no mejores márgenes, sino como cambio su dinámica frente a dicho ruido. Lo resultados de lo anterior se observan en la tabla 64 y se calcularon en base a la ecuación 63.

$$\% \text{ afectación} = \frac{|\text{Condiciones normales} - \text{Ante ruido}|}{\text{Condiciones normales}} \times 100 \% \quad (63)$$

Tabla 64 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control con los dos tipos de medición. Autoría propia

Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control										
Control	Indicadores		Régimen transitorio					Régimen estable		
			td(s)	tr(s)	tp(s)	Mp(cm)	ts(s)	Desviación estándar en régimen estable (cm)	Punto de asentamiento (cm)	% de error promedio en régimen estable (%)
PID	Experimento	Normal	1.917	0.6713	3	23.6768	18	0.09908	18.0311	0.3441
		Ruido	1.907	0.6617	3	21.2158	34	0.10609	17.9463	0.482
	% de Afectación		0.5216	1.43	0	10.394	88.88	7.075	0.4703	40.075
PID en cascada	Experimento	Normal	2.3835	1.222415	4.9	4.6474	14	0.0395	17.9966	0.05128
		Ruido	2.278	1.279	3.4	3.9134	31	0.133	18.0581	0.448
	% de Afectación		4.426	4.6289	30.612	15.79	121.428	236.71	0.3417	473.54
PID con VA	Experimento	Normal	1.12034	0.6135349	4.8	1.06849	41	0.06525	18.1462	0.8121
		Ruido	1.71312	1.12909	12.4	2.665	80	0.04225	17.9819	0.2173
	% de Afectación		52.9107	84.0302	158.333	149.417	95.1219	2.3	0.9054237	73.242
PID en cascada con VA	Experimento	Normal	6.6779	14.207	25.7	0.142322	27	0.0126313	18.048	0.26657
		Ruido	6.27758	13.1036	32.9	0.536379	50	0.0031027	18.0581	0.3046
	% de Afectación		5.9946	7.76659	28.0155	276.877	85.185	75.4364	0.05596	14.2664

Resaltando los resultados obtenidos en el régimen estable, ya que es el régimen de interés principal de esta investigación, en la comparación entre controladores en condiciones normales se obtuvo que el controlador PID fue el más deficiente en cuanto a la desviación en estado estable, donde el controlador PID con VA lo mejoro un 34.14412 %, el PID en cascada lo mejoro un 60.133% y el PID en cascada con VA lo mejoro un 87.2514%. En cuanto al error en estado estable el controlador PID con VA obtuvo la mayor deficiencia siendo mejorado por el PID en 57.628%, por el PID en cascada con VA en 67.1838% y por el PID en cascada en 93.6855%.

Por otro lado, en el error en estado estable ante ruido el controlador con peores resultados fue el PID, siendo mejorado un 7.0539% por el controlador PID en cascada, un 36.8% por el controlador PID en cascada con VA y un 54.917% por el controlador PID con VA.

El patrón de resultados anterior se repitió para el porcentaje de error en estado estable teniendo en cuenta la afectación por el ruido, en donde el control PID en cascada con VA obtuvo los mejores resultados con una afectación del 14.2664%, luego el control PID con un 40.075%, luego el control PID con VA con un 73.242% y por último el más crítico el control PID en cascada con un 473.54%.

CAPITULO 6

14. DISEÑO DE HMI

Para el diseño e implementación del HMI se realiza con base a la norma técnica ANSI-ISA 101, la cual establece estándares, prácticas recomendadas e informes técnicos relacionados con las HMI, que resulta en un control más seguro, más efectivo y eficiente del proceso, tanto en situaciones normales como anormales.

De acuerdo con el estándar, la HMI debe ser desarrollado y gestionado a través de un modelo de ciclo de vida; como se muestra en la siguiente figura.



Figura 488 Ciclo de vida de la HMI

Fuente: México Intech Automatización. Ciclo de vida de la HMI [en línea]. Disponible en:

<https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/02/12/caracteristicas-del-estandar-ansi-isa-101-01-2015-interfaces-humano-maquina-para-sistemas-de-automatizacion-de-procesos/>

Por lo tanto para una mejor comprensión se realiza el HMI en 3 etapas, en donde:

- La primera etapa se define la HMI a trabajar, teniendo en cuenta su referencia, resolución y todo lo referente funcionalidad y conectividad, permitiendo conocer el tipo de dispositivo con el que se trabajará y que alcances se tendrá con el mismo.
- La segunda etapa se conoce el proceso, el cual enviará la información a la interfaz y del que se tendrá control y adquisición de datos. Con el esquema P&ID, se conoce al detalle los elementos y equipos que componen el proceso y el correcto flujo de datos durante su funcionamiento

- La tercera etapa se encuentra la importancia de la norma ISA 101 y se realiza las 4 fases el ciclo de vida de la HMI.

14.1. ETAPA 1

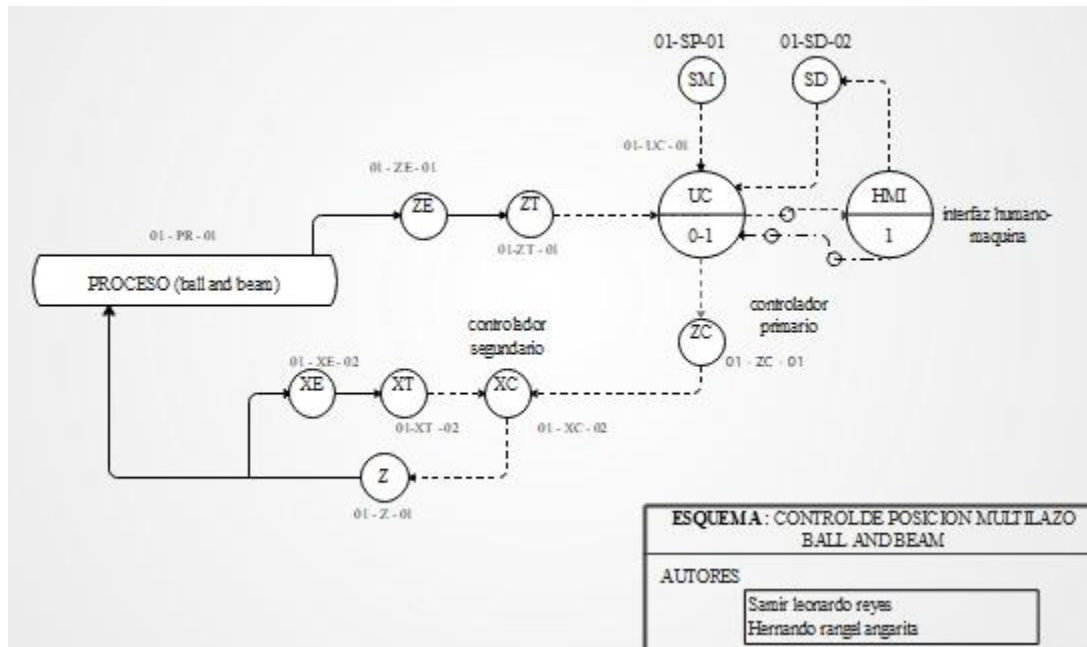
Según la matriz de selección de la tabla 10 se eligió una pantalla HMI de la serie inteligente de NEXTION, tiene 10.1 pulgadas con una resolución de 1024x600 pixeles y combina un procesador integrado y una pantalla táctil resistiva con memoria. Este tipo de pantalla permite la comunicación con el microcontrolador Arduino.

La pantalla HMI de Nextion se conecta a la MCU periférica a través de TTL Serial (5V, TX, RX, GND) para proporcionar notificaciones de eventos en las que la MCU periférica puede actuar, la MCU periférica puede actualizar fácilmente el progreso y el estado de regreso a la pantalla Nextion utilizando instrucciones simples basadas en texto ASCII.

14.2. ETAPA 2

En los módulos de instrumentación, los cuales disponen de una configuración flexible entre sus elementos (sensores, actuador) y dispositivos (bola y viga). Se identificaron los elementos e instrumentos como: el servomotor (Smart servo XYZ), el sensor ultrasónico (US016 Y HC-SR04), el potenciómetro, modulo relé. Dentro de los dispositivos se tiene todo lo referente a la estructura como: viga, riel de varillas, soportes para la instrumentación, canaletas para cables, entre otros.

En el plano P&ID de la siguiente figura se representa de forma esquemática la relación entre elementos, el cual es de gran ayuda para determinar el flujo de información que se quiere en el proceso.



como resultado que las fallas que se pueden presentar están asociadas a fallas en el actuador como el Smart servo XYZ. En este apartado resaltaremos el espacio físico donde se encuentran el sistema, el cual cuenta con iluminación óptima, un espacio libre para transitar además los estudiantes están muy cerca de la interfaz, en la cual se trabajó para que se destaque por la simplicidad en la pantalla, evitando usar colores fuera de la norma.

Para el diseño de la HMI se tendrán en cuenta los siguientes principios:

- Los gráficos deben ser entendibles y los mensajes deben facilitar la lectura.
- Se debe ver claramente el estado y las condiciones del proceso.
- Los elementos utilizados para la manipulación del proceso deben ser claramente distinguible.
- La HMI debe contener solo información importante, que permita determinar el estado del proceso.
- La HMI debe establecer un manejo lógico acorde al modelo mental de los operadores del proceso y un desarrollo orientado a las buenas prácticas.
- Las acciones importantes del proceso deben tener mecanismos de confirmación para evitar activaciones inadvertidas.
- El color correcto para el fondo de la pantalla debe ser de color gris claro (RGB 221, 221, 221), debido a que ofrece una mayor eficacia que solucionan los problemas de deslumbramiento, contrastes y la fatiga de los operadores.

Kit de Herramientas

Para la implementación se usó el editor de Nextion V 1.63.3, el cual es un entorno de software que permite la visualización de la pantalla HMI, sirve de simulador y de esta manera permite realizar modificaciones y ajustes sin estar conectada por hardware.

Además para que la pantalla funcione con el microcontrolador se descargó la librería “ITEADLIB_Arduino_Nextion-master”, con la cual se realiza el código para el funcionamiento de los diferentes elementos de la HMI como botones, textos, entre otros.

14.3.2. Fase 2: Diseño

Para el diseño se toma como base el plano P&ID, el cual nos indica la instrumentación que tiene el sistema. Dicho esto, se realiza una lista de los eventos que van a ocurrir en la planta y así poder insertar los componentes necesarios en la HMI.

- Hay dos tipos de mediciones, la primera es con un sensor ultrasónico, la cual medirá la distancia del carrito y la segunda es con una cámara, la cual medirá por medio de visión artificial la distancia de la bola.
- Se realiza el sistema con lazo normal y lazo cascada.
- Se debe graficar la señal que se obtiene a la salida del lazo.
- Va a ver dos tipos de ingresos, uno para el usuario y el otro es de mantenimiento de la planta.
- Debe existir cajas de texto que sirvan para mostrar la medición y para poder ingresar el set point.
- Debe existir botones, para regresar, dar inicio, salir, etc.

Con las acotaciones anteriores se realiza un bosquejo en el editor de Nextion, el cual sirva de base como plantilla para ver la simulación de la interfaz.



Figura 490 Bosquejo de la HMI (Tipo de medición). Autoría propia

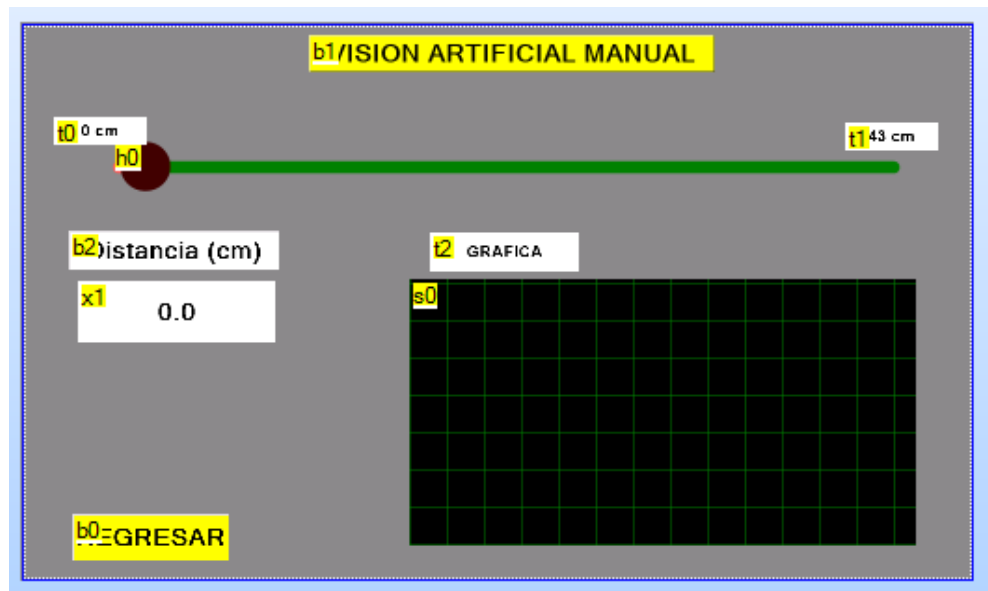


Figura 491 Bosquejo de HMI de la planta. Autoría propia

Como se puede ver en las figuras anteriores, que son parte de la interfaz previa, su normativa no corresponde a los estándares de la ISA 101, tampoco significa que sea incorrecta sino que no es un interfaz que pueda clasificarse como de alto desempeño, además como se dijo anteriormente es solo un bosquejo.

14.3.3. Fase 3: Implementación

En esta fase se trabajó en el desarrollo completo de la interfaz con el software, con la intención de llevar el diseño a una pantalla real y ver cómo el usuario ve la información que se muestra. Luego de la implementación se evaluó si el diseño expone la información adecuadamente y si se cumplió con los requerimientos previamente estudiados en la norma.

Teniendo el bosquejo se hicieron varias modificaciones, para implementar las distintas pestañas de la HMI, las cuales son:

- El login para el ingreso de usuario, ya sea operario o de mantenimiento.

Figura 492 Pestaña para ingreso. Autoría propia

- Se tiene un botón para cambio de contraseña

Figura 493 Pestaña para cambio de contraseña. Autoría propia

- Para el ingreso de tipo usuario se tiene la siguiente pestaña.



Figura 494 Pestaña tipo de ingreso usuario. Autoría propia

- Para este modo de operación se tiene un menú con los diferentes tipo de medición.



Figura 495 Pestaña para selección tipo de medición. Autoría propia

- Según el tipo de medición se dirige a una pestaña en donde se muestra el proceso de la planta, la gráfica de la respuesta, las distintas variables de control, el set point, entre otras.

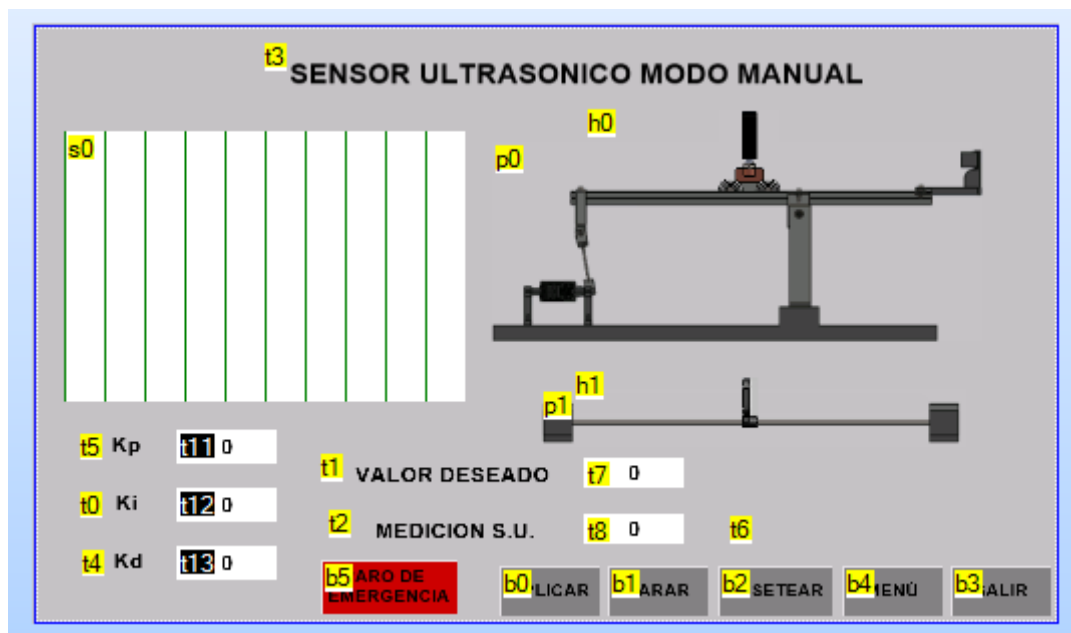


Figura 496 Pestaña de interfaz de la planta. Autoría propia

- Para el ingreso de tipo mantenimiento se dirige a la pestaña de la siguiente figura.



Figura 497 Pestaña tipo de ingreso mantenimiento. Autoría propia

- Como se puede observar hay dos formas de visualización del funcionamiento de la instrumentación de la planta.

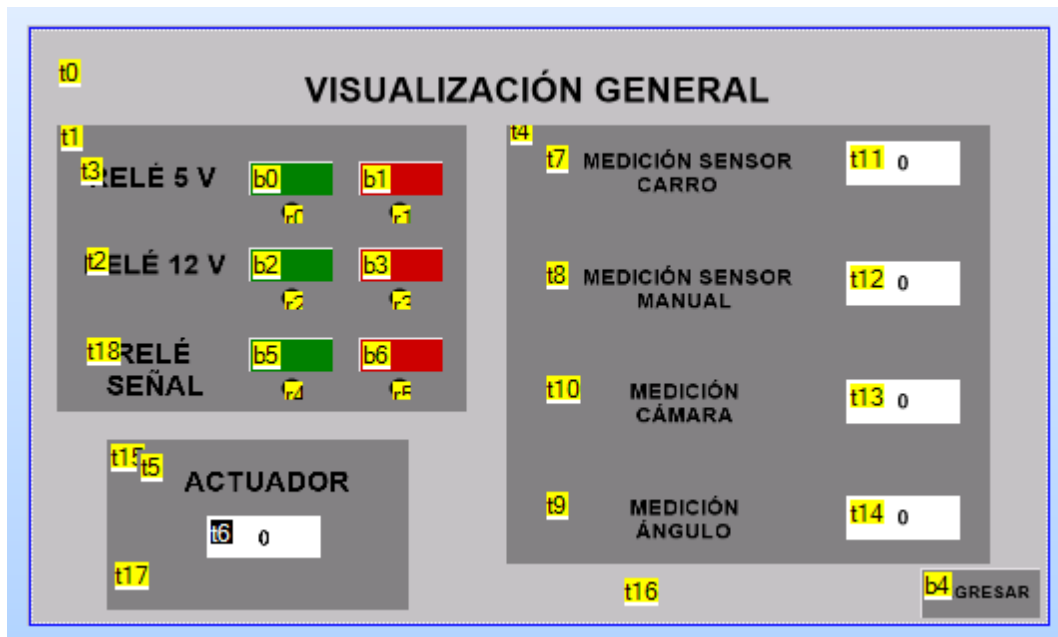


Figura 498 Pestaña visualización general de la instrumentación de la planta. Autoría propia



Figura 499 Pestaña visualización detallada de la instrumentación de la planta. Autoría propia

Hay que tener en cuenta que para la comunicación de la pantalla con el microcontrolador se debe tener claros 3 parámetros que son la página, el id y nombre de componente.

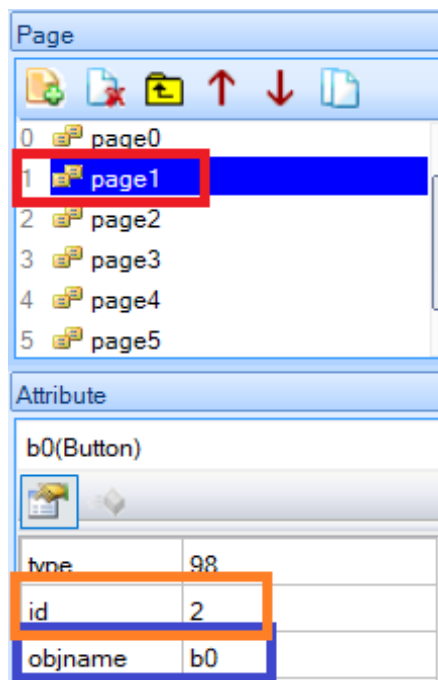


Figura 500 Parámetros para comunicación de la pantalla con el microcontrolador. Autoría propia

Como se puede observar en las figuras anteriores la interfaz hombre máquina muestra los colores ajustados a la norma, los gráficos en general no tiene colores que saturen y tiendan a fatigar la vista del usuario, permite trabajar un proceso sin animaciones de elementos móviles, solo la transición de elementos como el carro y en general se aplicó la norma acorde a su filosofía.

14.3.4. Fase 4: Operación

Para el modo de operación de la HMI se creó un manual, en el cual esta explicado el funcionamiento de cada componente. ([Anexo 13](#))

15. CONCLUSIONES

En el apartado 4.3 “análisis de los sistemas ball and beam”, se lleva a cabo la tabulación de la información en base a su estructura, sensórica, microprocesador y actuador de cada uno de los artículos y trabajos de grados consultados como antecedentes; se puede notar en la [figura 29](#) que el control PID clásico (Proporcional, integral, derivativo) es el de mayor aplicación por su óptima respuesta en los diferentes sistemas consultados, en base a esto y por el tipo de diseño elegido para la planta, se optó por llevar a cabo la implementación de este control, ya que ofrece los requerimientos necesarios tanto para implementación como para la etapa de aprendizaje colaborativa la cual se pretende desarrollar.

En la [figura 96](#) se describen los puntos críticos de estabilidad de un sistema en función de la posición de los polos, los cuales se hacen necesarios para poder establecer el comportamiento al cual este estará condicionado, como se puede observar en la [figura 98](#) la planta de estudio es sometida a un escalón a lazo abierto, la cual da una respuesta exponencial no convergente y que tiende a infinito, por lo tanto es necesario aplicar métodos de control congruentes a este tipo de sistema para lograr obtener un punto de estabilización al setpoint indicado y que los márgenes tanto en respuesta transitoria como estable obedezcan a los valores permitidos en cada uno de los casos, un ejemplo de esto se puede detallar en la [figura 111](#) donde se muestra la salida que tiene la planta a lazo cerrado, a la cual se aplicó un control PID logrando estabilización y convergencia al valor de la consigna.

Llevando a cabo el estudio e implementación de los diferentes controladores clásicos de tipo PID en base a distintos autores y con esto lograr un control eficaz para la planta de estudio, se implementó un control Proporcional- Derivativo (PD) mediante método de tuning de Matlab, el cual en condiciones normales es decir la planta no está sometida a ruido ni perturbaciones, logra tener convergencia al setpoint indicado (valor de la consigna), lo cual se puede observar en la [figura 156](#), pero como se observa en la [figura 160](#) cuando es sometido este mismo controlador a ruido (valor de 0.02175) no logra mitigar esta acción y la planta aunque presenta convergencia no logra llegar al setpoint indicado, lo cual hace que este sea un control no apropiado o deficiente para su aplicación en la planta real.

Analizando el diseño del controlador PID en el planta real junto con los diferentes controladores obtenidos a partir de las simulaciones, se puede inferir que el controlador real no coincide con los mismos valores de cualquiera de los calculados teóricamente, esto se debe a que las simulaciones son ideales, además hay varios parámetros físicos que no se contemplan en el modelado del proceso, debido a su difícil conjetura por su dinámica. Pero esto no quiere decir que los controladores

clásicos obtenidos no sirven para el desarrollo del diseño del controlador PID en la planta real, ya que en el caso nuestro nos da una caracterización de cómo es el comportamiento del sistema con los diferentes parámetros PID, como por ejemplo, la variable proporcional hace que el sistema oscile, la variable derivativa mejora la respuesta en el estado estable y la variable integral ayuda a que el sistema tenga un error aproximado a cero en estado estable.

Al realizar el cálculo del tiempo de establecimiento, por el método del 2 o 5 % y al aplicarlo en la respuesta obtenida del sistema se puede observar en la [figura 428](#) que este no tiene un alto porcentaje de fiabilidad, ya que no permite determinar con exactitud el valor en el que el sistema ya se ha estabilizado, por lo tanto para este caso es recomendable usar el método gráfico ([figura 429](#)), dando una mayor precisión con la obtención del dato y así con este poder realizar un estudio estadístico en estado estable.

Resaltando los resultados obtenidos en la [tabla 51](#) (“índices de afectación por el ruido en cada tipo de control”) en régimen estable, ya que es el régimen de interés principal de esta investigación, en la comparación entre controladores en condiciones normales se obtuvo que el controlador PID fue el más deficiente en cuanto a la desviación en estado estable, donde el controlador PID en cascada lo mejoro un 60.133 %. En cuanto al error en estado estable el controlador PID también obtuvo la mayor deficiencia siendo mejorado por el PID en cascada en 85.097 %. El patrón de resultados anterior se repitió para el porcentaje de error en estado estable donde el control PID obtuvo los mejores resultados con una afectación del 40.075% y luego control PID en cascada con un 473.54%.

El diseño de una interfaz con base en estándar ISA 101, permite que la implementación de una HMI sea de alto desempeño, con la que se tiene una fácil interacción con los operarios, agiliza el monitoreo de alarmas y ayuda a que los elementos generen un bajo contraste, las únicas animaciones que se permiten son para representar situaciones anormales, las cuales deben ser fácilmente identificables. Por lo tanto, al hacer uso de esta norma a nivel industrial aumenta el rendimiento de los equipos de control, permitiendo responder rápidamente a las tareas asignadas, lo que termina disminuyendo el tiempo en la transmisión de datos a los dispositivos de control.

Como principal objetivo de este trabajo era realizar el control de posición multilazo del sistema ball and beam mediante la medición con un sensor ultrasónico para saber la posición del carro, dando cumplimiento a este se optó por implementar un sistema de medición por medio de visión artificial, con el cual se hicieron varias pruebas muestrales con controladores como PID clásico y PID clásico en cascada, obteniendo un análisis estadístico. Teniendo dicho análisis se realiza un estudio comparativo de los controladores entre los dos tipos de medición ([tabla 62](#) y [tabla](#)

[63\)](#) En conclusión, de este, se resaltan los resultados obtenidos en régimen estable, ya que es el régimen de interés principal en este trabajo, en donde se tiene que entre los controladores en condiciones normales el controlador PID fue el más deficiente en cuanto a la desviación en estado estable, donde el controlador PID con VA lo mejoro un 34.14412 %, el PID en cascada lo mejoro un 60.133% y el PID en cascada con VA lo mejoro un 87.2514%. En cuanto al error en estado estable el controlador PID con VA obtuvo la mayor deficiencia siendo mejorado por el PID en 57.628%, por el PID en cascada con VA en 67.1838% y por el PID en cascada en 93.6855%.

16.RECOMENDACIONES

Por ultimo se considera oportuno dejar constancia de las posibles mejoras o ampliaciones que a partir de este trabajo se podrían hacer por parte de los alumnos en próximos proyectos, que si bien por el alcance limitado del trabajo no han podido ser incluidas.

- Podría hacerse un estudio con diferentes tipos de control como lo son los controladores modernos, controladores difusos, entre otros.
- Por otro lado seria posible realizar un sistema de control con redes neuronales.
- Debido al alto valor del parámetro K_d en los diferentes controladores hallados en este trabajo seria de vital importancia realizar una investigación o un análisis del por qué del gran tamaño numérico de este parámetro respecto a los otros.
- Cuando se hace uso del HMI hay pestañas las cuales no funcionan perfectamente, una causa de esto se debe al gran número de variables en el Arduino lo cual provoca una saturación en el puerto UART, otra razón podría ser un mal manejo de los tiempos en el código, por lo tanto seria de vital importancia hacer un estudio para encontrar una solución a este problema.
- La obtención de los parámetros de los diferentes controladores se hizo de forma heurística, una mejora importante seria obtener el sistema real mediante el segundo método de Z&N, y así tener una mejor entonación del controlador.
- Finalmente, para una mejor respuesta del sistema podría utilizarse el mecanismo del Anti-Windup

17. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CHEN, Zhijun; GAO, Feng; SUN, Qiao y TIAN, Yuan. Planificación de movimiento de bola en placa para robots de seis patas paralelas para caminar en terrenos irregulares utilizando información háptica pura. En: Elsevier. Vol.141, (Noviembre,2019); p.136-150.

ARAUJO, Anabel. Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi. Sevilla, 2018, 116p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera ingeniería industrial).Universidad de Sevilla. Facultad de ingeniería. Ingeniería de Sistemas y Automática.

BLAS, Ángel; FUENTES, Oscar; GARCÍA, Javier y SOLIS, Ulises. El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robótica. En: Congreso Internacional de Robótica y Computación (2:Abril,2015:Ciudad de México,México). Conferencia. Ciudad de México:Cinvestav,2015. p.206-213.

ANTOLINES, José; LÓPEZ, Francy y MONROY, Paola. Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos. En: Tecnura. Vol.15, N°30, (Jul-Dic.2011); p.12-23.

CHALLENGER, Ivet; DÍAZ, Yanet y GARCIA, Antonio. El lenguaje de programación Python. En: Ciencia Holguín. Vol.20, N°2, (Abr-Jun,2014); p.1-13.

FLORES, Manuel; GARCÍA, Gina; GARCÍA, Rodrigo y TORRES, Gualberto. Métodos de programación segura en Java para aplicaciones móviles en Android. En: Ciencia Ergo Sum. Vol.21, N°3, (Noviembre,2014); p.243-248.

MOORE, Holly. *MATLAB para ingenieros*. Estados Unidos. Pearson Prentice Hall. Febrero, 2018. 619p.

CANO GARZON, Hugol; CHAVES OSORIO, Andres y CORTES OSORIO, Alexander. *Fundamentos y aplicación del muestreo en señales ubicadas en las bandas altas del espectro*. En: *Scientia Et Technica*. Vol.2, N°39, (1 de agosto de 2008); p.37-42.

CHUNG PINZÁS, Alfonso Ramón; INCHE MITMA, Jorge Luís y RUÍZ LIZAMA, Edgar. *Desarrollo de una interfaz hombre orientada al control de procesos*. En: *Industrial Data*. Vol. 11, núm.1. Abril, 2008. p.70-72.

BÁEZ PRIETO, Raúl; REGALÓN ANIAS, Orlando; Rodríguez, Milagros y Rodríguez, Vladímir. *Aplicación de algoritmos de control clásico, adaptable y robusto a sistemas dinámicos de parámetros variables*. En: *Ingeniería Energética*. Vol.33, No. 3. 2012 Septiembre – Diciembre. p. 184-195.

AGUADO, Alberto y CIPRIANO, Aldo. *Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos*. En: *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*. Vol.6, No. 1. Enero 2009. p. 20-30.

OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. Quinta edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010. 904p.

REZA, Mohammad y ZAARE, Saeed. *El control de posición del sistema ball and beam utilizando el control de modo de deslizamiento difuso adaptativo basado en la observación de perturbaciones de estado en presencia de incertidumbres coincidentes y no coincidentes*. En: *ELSEVIER*. Vol.150, (26 agosto 2020).

AL-SAGGAF, Ubaid; MANSOURI, y MUSTAFA, Ibrahim. *Diseño de controlador fraccional de dos grados de libertad: aplicación al sistema de bolas y vigas*. En: *Elsevier*. Vol.135, (Noviembre, 2018); p.13-22.

CHANG, Chia-Wen; CHANG, Yeong-Hwa y LIN, Hung-Wei. *Control de modo deslizante difuso para el sistema de bolas y rayos con optimización de colonias de hormigas difusas*. En: *Elsevier*. Vol.39, No.3 (Febrero, 2012); p.3623-3633.

CASTILLO, Oscar y Hung-Wei SORIA. *Nuevo enfoque que utiliza la optimización de colonias de hormigas para un diseño de control difuso aplicado al sistema de bolas y vigas*. En: *Elsevier*. Vol.294 (Febrero, 2015); p.203-215.

MÉXICO INTECH AUTOMATIZACIÓN. "Ciclo de vida de la HMI", (enero 2015) <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/02/12/caracteristicas-del-estandar-ansi-isa-101-01-2015-interfaces-humano-maquina-para-sistemas-de-automatizacion-de-procesos/>.

GARCIA, David. "ISA 101 Norma para el diseño HMI", estándar y normativa y legislación,(18 noviembre 2015). <https://www.infoplcn.net/actualidad-industrial/item/102902-isa101>

hmi#:~:text=La%20norma%20pretende%20proporcionar%20orientaci%C3%B3n,todas%20las%20condiciones%20de%20funcionamiento.

GUPTA, Akash (28 Sep. 2021). "INCA Tools- Aptitune: ahorra tiempo y dinero también para ajustar los controladores". Incatools.

<https://blog.incatools.com/hydrogen-reduce-the-venting-inside-refinery>

ARAUJO, Jair. Metodología para la implementación de controladores difusos tipo ii en procesos industriales. Pamplona, Norte de Santander, 2020, 233p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera de maestría en controles industriales). Universidad de Pamplona. Facultad de Ingenierías y Arquitectura.

ORTIZ,F. y WEN, Y. Diagrama esquemático del BBS [imagen]. En: Actas de la Conferencia IEEE 2005 sobre aplicaciones de control, 2005. CCA 2005., IEEE.

DHANALAKSHMI, K; NAKSHATHARAN, Sunjai y SELVARANI, Josephine. Diagrama de bloques esquemático[imagen]. En: Elsevier. India: Department of Instrumentation and Control Engineering National Institute of Technology Tiruchirappalli, 2014. p.579.

ÁLVAREZ, Juan; MORENO, Jorge Y RAMÍREZ, Edwin. Diseño e implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico - PIT000. 08 de mayo de 2017.

XINQUAN, Zhang y CHENGLI, Su. Análisis de estabilidad y diseño anti-windup de sistemas lineales conmutados con saturación del actuador. En: Revista Internacional de Control (Springer link), Automatización y Sistemas. En línea, marzo 2018.

DÍAZ, J ; HERNÁNDEZ, E. y PINZÓN, O. Comparación de diferentes técnicas de control aplicadas al control de temperatura en tiempo real. ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 - Número 18 - Año 2011.

LI, Jie; QI, Xiaohui; WAN, Hui y XIA, Yuanqing. Configuración experimental del sistema de viga esfera[fotografía]. En: Elsevier. China: School of Automation, Beijing Institute of Technology, 2018. p.8547.

B., Meenakshipriya y K., Kalpana. Sistema de bolas y vigas [imagen]. En: Elsevier. India: Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Kongu Engineering College, 2014. p.621.

CHEN, Sheng-Hang; LIAN, Sing-Han y WU, Shang-Teg. Control de vibración de una viga flexible impulsada por una etapa de husillo de bolas con filtros de muesca adaptables y un mejorador de línea. En: Elsevier. Vol.348, (Julio,2015); p.71-87.

DHANALAKSHMI, K; NAKSHATHARAN, Sunjai y SELVARANI, Josephine. Equilibrio de bola y viga impulsada por una aleación con memoria de forma: posible actuador para un control estabilizado. En: Elsevier. Vol.47, No. 1 (marzo,2014); p.577-584.

B., Meenakshipriya y K., Kalpana. Modelado y control del sistema de bolas y vigas utilizando un controlador PID basado en el método de diagrama de coeficientes (CDM). En: Elsevier. Vol.47, No. 1 (marzo,2014); p.620

L. R. Da Silva, R. C. C. Flesch, and J. E. Normey-Rico, "Analysis of Anti-windup Techniques in PID Control of Processes with Measurement Noise," IFAC-PapersOnLine, vol. 51 (4), pp. 948-953, 2018.

ANZUREZ, M. Juan, P. G. (2018). Estabilidad de Sistemas No-lineales: Sistema de líquidos de dos tanques interconectados. REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN.

ALLENDE PEÑA J.M.; RODRÍGUEZ PAREDES S.A.; Salmerón Quiroz B.B..(2018). Análisis y resultados experimentales de controladores de posición angular en un Aero péndulo.Ingenierías,3(2),118-124.

CASTRO J.; VERGARA C. y HERRERA J..(2018). Comparación de un control lineal y no lineal en un levitador magnético. Ingenierías USBMed,9(1),112-118.

SALAMEA, C. Calibración Automática en Filtros Adaptativos para el Procesamiento de Señales EMG(Electromiografía). Revista iberoamericana de automática e informática industrial, (2019).

AGUADO, A.Temas de identificación y Control Adaptable. Edición del Instituto de Cibernética, Matemática y Física(ICIMAF), 2000.

FRANCOIS, J. "Comparación de métodos de identificación basados en la respuesta impulsiva y al escalón". Trabajo de ascenso, Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, Departamento de Ciencias Técnicas,Mérida, 1995.

CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 8 Edición. Editorial Alfaomega, 2011.

OGATA, K., Designing Linear Control Systems with MATLAB. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1994.

SZKLANNY, Sergio V y BEHRENDTS, Carlos. Sistemas digitales de control de procesos. En: Editorial control. 2° Ed., Buenos Aires (2006).

BISHOP, Robert y DORF, Richard. Sistemas de control moderno. En: Pearson Education. 10° Ed., Madrid (2005).

DELGADO, Alfonso. Diseño, implementación y control de un "ball and beam". Sevilla, 2020, 98p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera ingeniería de las tecnologías industriales).Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Facultad de ingeniería. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática.

CORREA, Oscar y ROMERO, Hector. Desarrollo de un sistema Ball and Beam, para implementar estrategias de control mediante LABVIEW . Bucaramanga, 2010, 55p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera Especialista en control e instrumentación industrial).Universidad pontificia Bolivariana. Facultad de ingeniería.

LOPEZ, Felix; MORA, Antonio y OLVERA, Cesar. Diseño, construcción y control de un "Ball and Beam" . Pachuca, México, 2008, 143p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera para optar por el título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones).Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Facultad de ingeniería.

ALZATE, Rubén y REINA, Alberto. Diseño, construcción y control de un sistema electromecánico subactuado; el sistema "Bola-Viga" . Santiago de Cali, 2006, 233p. Trabajo de investigación (Proyecto fin de carrera para optar por el título de ingeniero mecatrónico).Universidad Autónoma de occidente. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería mecatrónica.

18. ANEXOS

ANEXO 1 : [Código para toma de datos del Smart servo XYZ](#)

ANEXO 2 : [Código para el control PID clásico](#)

ANEXO 3 : [Código para control PID en cascada](#)

ANEXO 4 : [Código de control PID clásico con visión artificial](#)

ANEXO 5 : [Código de control PID en cascada con visión artificial](#)

ANEXO 6 : [Datos del Smart servo XYZ.](#)

ANEXO 7 : [Datos del sistema en lazo cerrado con controlador PID y PID en cascada.](#)

ANEXO 8 : [Datos del sistema en lazo cerrado con controlador PID y PID en cascada para visión artificial.](#)

ANEXO 9 : [Código general de la planta en Arduino](#)

ANEXO 10 : [Código de Visión artificial en Matlab](#)

ANEXO 11 : [Diagrama de bloques de controladores continuos en Simulink/Matlab](#)

ANEXO 12 : [CAD de la planta en SolidWorks](#)

ANEXO 13 : [Manual del HMI](#)

ANEXO 14 : [Guía para identificación de la planta](#)

ANEXO 15 : [Guía para diseño de controladores de la planta \(teórica y realmente\)](#)

ANEXO 16 : [Código de componentes planta \(sensores, actuador, entre otros\)](#)

ANEXO 17 : [Código filtro RGB](#)