



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica

Tesis

**Diseño de un sistema de control PID
de nivel de una esfera accionado
por flujo de aire**

para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecatrónico

Alberto Jesús Torres Hinostroza

Huancayo, 2018



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a los profesores que tuve a lo largo de los cinco años de carrera universitaria que de un modo u otro aportaron a mi crecimiento profesional con sus conocimientos y experiencia.

A mi asesor de tesis quien oriento mis conocimientos y me brindó su apoyo resolviendo mis dudas para poder realizar la presente investigación, a la facultad de ingeniería y a la escuela académica profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Continental, por brindarme su apoyo y respaldo académico en la culminación de mi carrera.

Y finalmente a mis compañeros y amigos que fueron parte de mi entorno de desarrollo con los que pude compartir y llenarme de conocimientos, trabajando en equipo y desarrollando proyectos.

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino hacia el bien, por darme salud y permitirme llegar a este punto de mi vida.

A mis padres Wilber y Beatriz quienes con su apoyo, esfuerzo, afecto y enseñanzas me permitieron culminar mi carrera universitaria y me formaron para ser una persona de bien.

A mi hermano menor Jair quien es un motivo a seguir adelante, y poder ser un buen ejemplo para él.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1	Planteamiento y formulación del problema.....	12
1.1.1	Problema general	12
1.1.2	Problemas específicos	12
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	Objetivo general	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	Justificación	13

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del problema.....	14
2.1.1.	Antecedentes Nacionales.....	14
2.1.2.	Antecedentes Internacionales	16
2.2.	Estado del arte	16
2.3.	Bases teóricas.....	19
2.3.1.	Levitación	19
2.3.2.	Sistema de levitación neumática tubo – esfera.....	19
2.3.3.	Principio matemático del sistema de levitación neumática.....	20
2.3.4.	Actuador	23
2.3.5.	Sensor.....	25
2.3.6.	Controlador	28
2.3.7.	Técnicas de control.....	37
2.4.	Definición de términos básicos	50

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1.	Tipo de investigación	52
3.2.	Resultados esperados	52
3.3.	Metodología para el análisis y diseño de un sistema de control	53

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4.1.	Identificación de requerimientos	54
4.1.1.	Requerimientos generales:	54

4.1.2.	Requerimientos mecánicos:	54
4.1.3.	Requerimientos eléctricos y electrónicos:	54
4.1.4.	Requerimientos de los elementos del sistema.....	55
4.2.	Análisis de la solución	55
4.2.1.	Estructura de funciones	55
4.2.2.	Diseño conceptual.....	57
4.2.3.	Análisis de componentes	60
4.2.4.	Análisis de la tecnológica seleccionada	60
4.3.	Diseño	65
4.3.1.	Diseño de la estructura del prototipo	65
4.3.2.	Diseño electrónico	70
4.3.3.	Diseño del sistema de control	71
4.3.4.	Análisis del modelo de control para su implementación.....	80

CAPÍTULO V. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

5.1.	Presupuesto	85
5.2.	Construcción.....	87
5.2.1.	Construcción del prototipo	87
5.2.2.	Proceso de análisis y validación.....	90
5.2.3.	Modelo de control.....	96
5.3.	Pruebas:.....	99
5.4.	Discusión de Resultados	104
5.5.	Conclusiones	104
5.1.	Recomendaciones	105
5.2.	Trabajos futuros.....	105

BIBLIOGRAFÍA

Anexo C

Anexo D

Anexo E

Anexo F

Anexo G

Anexo H

Anexo I

Anexo J

Lista de figuras

Figura 1. Módulo educativo para el control de temperatura.....	14
Figura 2. Módulo educativo para el control del sistema bola y varilla	15
Figura 3. Planta robusta de levitación neumática.....	17
Figura 4. Sistema de levitación neumática de la Universidad de la Sierra Sur	18
Figura 5. Sistema tubo – esfera de levitación neumática con control basado en red neuronal.....	18
Figura 6. Resistencia aerodinámica de la esfera.....	20
Figura 7. Coeficiente de arrastre de distintos cuerpos	21
Figura 8. Fuerzas en la esfera	22
Figura 9. Ventilador centrífugo Industrial Atenas 380v 1/2 Hp 1400 Rpm.....	23
Figura 10. Ventilador Corsair SP120.....	24
Figura 11. Ventilador Corsair AF140.....	24
Figura 12. Sensor de distancia de una sola membrana	25
Figura 13. Sensor ultrasónico HC-SR04	26
Figura 14. Angulo de apertura del sensor ultrasónico HC-SR04	26
Figura 15. Sensor Infrarrojo de distancia SHARP GP2Y0A21.....	27
Figura 16. Grafica de distancia Vs. Voltaje del SHARP GP2Y0A21	28
Figura 17. Arduino UNO	28
Figura 18. Arduino NANO	29
Figura 19. Arduino MEGA 2560	30
Figura 20. Arduino DUE.....	31
Figura 21. Raspberry Pi 3 Modelo B	32
Figura 22. Raspberry Pi ZERO	33
Figura 23. Microcontrolador PIC16F18875	34
Figura 24. Curiosity High Pin Count (HPC) Development Board DM164136.....	35
Figura 25. CI Op-amp 741	36
Figura 26. Diagrama de control PID.....	39
Figura 27. Respuesta del control proporcional	40
Figura 28. Respuesta del control proporcional – integral	41
Figura 29. Respuesta del control proporcional – derivativo	42
Figura 30. Curva S de respuesta	43
Figura 31. Respuesta con oscilaciones sostenidas.....	44
Figura 32. Sistema mecánico resorte – masa	49

Figura 33. Caja Negra del sistema de levitación	55
Figura 34. Sistema tubo – esfera para control de nivel	57
Figura 35. Diagrama de funciones	57
Figura 36. Diseño conceptual del sistema de levitación neumática.....	58
Figura 37. Diseño conceptual de la estructura del sistema de levitación neumática ...	58
Figura 38. Diagrama de flujo principal.....	59
Figura 39. Diagrama de componentes	60
Figura 40. Amplificador de señal de control	62
Figura 41. Disposición de elementos de entrada del HMI	64
Figura 42. Disposición de elemento de salida del HMI.....	64
Figura 43. Display LCD 16x2	65
Figura 44. Vista general del módulo de levitación neumática.....	65
Figura 45. Vista de la base-soporte del módulo de levitación neumática	66
Figura 46. Vista del HMI del módulo de levitación neumática	67
Figura 47. Vista de los grabados en el HMI	67
Figura 48. Vista posterior del HMI.....	68
Figura 49. Vista de la parte inferior del sistema tubo – esfera.....	68
Figura 50. Vista de la parte superior del sistema tubo – esfera.....	69
Figura 51. Vista de la estructura de soporte del sensor	69
Figura 52. Vista de la placa electrónica	70
Figura 53. Vista de los componentes y pistas de la placa electrónica	70
Figura 54. Tabla de componentes electrónicos.....	71
Figura 55. Fuerzas que actúan sobre la esfera.....	71
Figura 56. Diagrama de bloques del primer estado.....	75
Figura 57. Diagrama de bloques del segundo estado	75
Figura 58. Diagrama de bloques del segundo estado	75
Figura 59. Diagrama de bloques de la planta.....	76
Figura 60. Diagrama de bloques de estado con feedback y control PID	77
Figura 61. Sistema skyhook.....	77
Figura 62. Diagrama de bloques del primer estado óptimo	78
Figura 63. Diagrama de bloques del segundo estado óptimo.....	79
Figura 64. Diagrama de bloques de estado del sistema óptimo	79
Figura 65. Respuesta del modelo óptimo con amortiguamiento $0 < \zeta < 1$	82
Figura 66. Respuesta del modelo óptimo para un valor de amortiguamiento mayor a la unidad.....	83
Figura 67. Prototipo de levitación neumática implementado.	87

Figura 68. Placa electrónica ensamblada	88
Figura 69. Sensor implementado	88
Figura 70. Panel HMI del sistema	89
Figura 71. Ventilador incorporado en su soporte.....	89
Figura 72. Número de ciclo Vs. Variación de Tiempo.....	90
Figura 73. Gráficos de entrada y salida del sistema.....	91
Figura 74. Polos y ceros del modelo identificado	92
Figura 75. Polos y ceros del modelo calculado	93
Figura 76. Respuesta del modelo a un Step.	94
Figura 77. Sobreimpulso en la respuesta del modelo a un Step.	95
Figura 78. Modelo medido y modelo simulado	95
Figura 79. Diagrama de bloques en el dominio del tiempo.....	96
Figura 80. Diagrama de bloques en el dominio del tiempo.....	96
Figura 81. Respuesta del sistema sin factor de corrección.	97
Figura 82. Respuesta del sistema con factor de corrección	97
Figura 83. Diagrama de bloques en tiempo discreto con bias	98
Figura 84. Diagrama de bloques en tiempo discreto completo.....	98
Figura 85. Prueba para Kff igual a 0.1	99
Figura 86. Prueba para Kff igual a 0.2	99
Figura 87. Prueba para Kff igual a 0.3	100
Figura 88. Prueba para Kff igual a 0.4	100
Figura 89. Prueba para Kff igual a 0.5	101
Figura 90. Prueba para Kff igual a 0.6	101
Figura 91. Prueba para Kff igual a 0.7	102
Figura 92. Prueba para Kff igual a 0.8	102
Figura 93. Prueba para Kff igual a 0.9	103
Figura 94. Prueba para Kff igual a 1	103

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Arduino UNO.....	29
Tabla 2. Especificaciones técnicas del Arduino NANO	30
Tabla 3. Especificaciones técnicas del Arduino MEGA 2560	31
Tabla 4. Especificaciones técnicas del Arduino DUE	32
Tabla 5. Especificaciones técnicas del Raspberry Pi 3 Modelo B	33
Tabla 6. Especificaciones técnicas del Raspberry Pi ZERO.....	34
Tabla 7. Especificaciones Técnicas del Microcontrolador PIC16F18875	35
Tabla 8. Configuraciones básicas de los Amplificadores Operacionales	37
Tabla 9. Tabla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón	43
Tabla 10. Tabla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en La ganancia critica.	44
Tabla 11. Tabla de resultados esperados.	53
Tabla 12. Tabla de conexiones Arduino – Sensor.....	60
Tabla 13. Tabla de conexiones Arduino – Entradas HMI	61
Tabla 14. Tabla de conexiones Arduino – Salidas HMI	61
Tabla 15. Tabla de conexiones Arduino – Amplificador de señal	61
Tabla 16. Tabla de características del sensor ultrasónico HC-SR04.....	62
Tabla 17. Características del ventilador Innovative dc brushless	63
Tabla 18. Tabla de características de la esfera de tecnopor	63
Tabla 19. Presupuesto para la estructura del sistema.....	85
Tabla 20. Presupuesto para la interfaz del sistema.....	85
Tabla 21. Presupuesto para la electrónica del sistema	86
Tabla 22. Presupuesto para el corte láser.....	86
Tabla 23. Presupuesto de mano de obra	86
Tabla 24. Matrices de estados calculados e identificados.....	91
Tabla 25. Matrices de estados con valores significativos	92

RESUMEN

En la Universidad Continental los alumnos pertenecientes a las distintas escuelas de la facultad de ingeniería basan su formación basada en proyectos, pero se manifiesta una deficiencia en el desarrollo de sus proyectos, siendo muchos de estos creados e implementados, bajo una metodología empírica.

Es así que se implementó el sistema tubo – esfera de levitación neumática, debido a sus características de control, ya que permite evidenciar de manera directa cómo es que afectan las variables de control al funcionamiento del sistema. El presente trabajo de investigación no busca medir el rendimiento académico ni el nivel de comprensión de la teoría y la práctica por parte de los alumnos en el curso de ingeniería de control, se ofrece una solución tecnológica que parte de la implementación de un módulo desde el punto de vista de la ingeniería, donde toda la atención se centra en las prestaciones que debe tener dicho modulo y la influencia de un controlador.

Palabras claves: ingeniería de control, levitación neumática, control moderno, control óptimo.

ABSTRACT

In the Continental University the students belonging to the different schools of the faculty of engineering base their training on the development of projects, but there is a deficiency in the development of their projects, many of which are created and implemented, under an empirical methodology.

This is how the pneumatic levitation tube-sphere system was implemented, due to its control characteristics, since it makes it possible to directly demonstrate how the control variables affect the functioning of the system. This research work does not seek to measure the academic performance or level of understanding of the theory - practice by students in the course of control engineering, it offers a technological solution that starts from the implementation of a module from the point of view of engineering, where all the attention is focused on the benefits that the module must have and the influence of a controller.

Keywords: control engineering, pneumatic levitation, modern control, optimal control.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal poder desarrollar un módulo de control con una metodología propia de la ingeniería, analizando y validando el comportamiento del sistema, para así poder implementar una lógica de control óptimo, con prestaciones de robustez en el controlador.

En el primer capítulo se abordan el contexto, la problemática, los objetivos y la justificación para el desarrollo de la tesis.

En el segundo capítulo se presentan el marco teórico comprendido por los antecedentes del problema, el estado de arte que nos muestra el estado actual de la tecnología a implementar, seguido a esto se presenta toda la teoría y los conocimientos que se deben de tener para poder comprender el funcionamiento del sistema, además de opciones para los distintos elementos que lo componen, que se deben de tener en cuenta para la implementación del módulo.

En el tercer capítulo se muestran los resultados esperados, así como también la metodología utilizada para la implementación.

En el cuarto capítulo podemos encontrar el análisis de la solución y el diseño, además de todo lo necesario para la implementación del prototipo como: el diseño de la estructura, el diseño del controlador a usar, las características que debe tener y las limitaciones, este capítulo se complementa con el marco teórico ya que se parte de los conocimientos previos para poder implementar el sistema.

En el quinto capítulo se presentan la construcción, las pruebas realizadas, así como los resultados y conclusiones.

Culminando el documento con la bibliografía y los anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

Dentro del curso de ingeniería de control que es impartido a las carreras de ingeniería en la Universidad Continental de Huancayo, se presentan tópicos como: modelado de sistemas mecánicos y eléctricos, estabilidad, análisis del lugar geométrico de las raíces, controladores PID (*Proporcional Integral Derivativo*), entre otros. Siendo la naturaleza del curso teórico – práctica.

Dentro del desarrollo de controladores a nivel práctico, se puede evidenciar la falta de módulos para el trabajo de control y sintonización de controladores PID que reflejen cómo es su correcto desarrollo, dando así al curso una orientación teórica y en caso de ser práctica, con la generación de proyectos por parte de los alumnos y docentes, estos proyectos no evidencian que el alumno haya comprendido las implicaciones e importancia del modelamiento de sistemas, presentando en muchos casos un control mal diseñado, donde el correcto desarrollo de controladores y la importancia del análisis matemático de los sistemas que en la práctica pasan a un plano secundario para los alumnos, siendo evidente la brecha entre la teoría y la práctica de la asignatura.

Es así que se percibe el problema de la ausencia de un módulo que pueda servir para que el alumno comprenda las implicaciones teóricas al momento de desarrollar, programar o diseñar controladores, permitiéndoles poder crear controladores eficientes, bajo una metodología basada en la ingeniería.

1.1.1 Problema general

- ✓ Ausencia de un módulo de control que permita desarrollar prácticas de laboratorio acorde al nivel teórico – práctico de la asignatura de ingeniería de control.

1.1.2 Problemas específicos

- ✓ Poco entendimiento del modelamiento de sistemas de control y sus implicaciones en el diseño de controladores.
- ✓ Escaso entendimiento del funcionamiento de los controladores PID y su correcto desarrollo a nivel práctico.
- ✓ Poca comprensión de la importancia de la teoría de control y su relación con la tecnología existente.

- ✓ Poco entendimiento del comportamiento de los sistemas ideales de la teoría con el comportamiento real de los sistemas en la práctica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- ✓ Diseñar un sistema de control de nivel de una esfera accionado por flujo de aire que permita desarrollar prácticas para la comprensión de la influencia de un controlador en el sistema.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Desarrollar un sistema de control que permita utilizar la respuesta de un modelo de control en su comportamiento.
- ✓ Desarrollar el algoritmo PID para el control de estabilidad de una esfera basado en el análisis de las variables de control.
- ✓ Diseñar el sistema de control que permita comprender la importancia de la tecnología seleccionada.
- ✓ Diseñar un módulo de control que permita evidenciar la relación entre la teoría de control y su aplicación directa.

1.3 Justificación

Dentro de las competencias que debe presentar el alumno al termino del curso de ingeniería de control se manifiesta que: “Diseña sistemas de control, con responsabilidad y trabajo en equipo, mediante el desarrollo de sus conocimientos fundamentales de las teorías de control”. Siendo el principal inconveniente el poco interés del diseño de sistemas de control de un modo idóneo, es por esto que se busca poder brindar una herramienta en la cual pueda poner en práctica los conceptos aprendidos dentro del curso.

Es así que se evidencia la importancia de la realización de la presente tesis, ya que busca desarrollar un sistema de control para que entre en sinergia la teoría con la práctica de la teoría de control. Debido a que el estudio de los controladores es parte importante de la formación de un ingeniero, estos conocimientos deben ser bien comprendidos y entendidos para que el alumno y futuro profesional pueda diseñar sistemas de control eficiente y con responsabilidad.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes Nacionales

Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura.

Tesis desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Perú por el Ing. Yossi Giovanni Fuertes Paucar en Lima – Perú. [1] Se desarrolló el módulo de control educativo con la finalidad de ofrecer una herramienta con la que se logre brindar conocimientos teóricos – prácticos, se realizó la implementación, luego se extrajo el modelo matemático y se desarrolló el algoritmo de control PID. La tesis finalizó con las siguientes conclusiones: un correcto desarrollo del diagrama de proceso, la obtención de modelo matemático aproximado del sistema, y el desarrollo de una interfaz intuitiva y funcional que permite variar la referencia y sintonizar los parámetros de control PID.

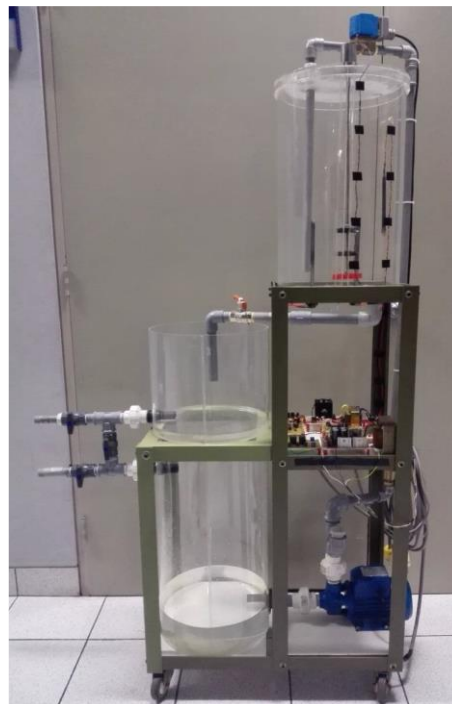


Figura 1. Módulo educativo para el control de temperatura

Fuente: Pontificia Universidad Católica del Perú. Por: Yossi Giovanni Fuertes Paucar.

Aporte: Análisis y extracción de las características del sistema una vez construido, análisis de los componentes del sistema para que cumpla el nivel

requerido de una planta de control educativo y diseño de una interfaz simple e intuitiva para su uso.

Diseño e implementación de un módulo educativo para el control del sistema bola y varilla.

Tesis presentada por el Bach. Pavel Meneses Morales y el Bach. Henry Daniel Zafra Siancas para optar el título de ingeniero electrónico en la Pontificia Universidad Católica del Perú. [2] La tesis presenta un sistema de barra – bola para el uso como módulo educativo para las especialidades que cursen las asignaturas de control, así mismo como parte práctica en el análisis de sistemas no lineales e inestables, se hace uso de Matlab y simulink para analizar el comportamiento del sistema, además se diseña e implementa el controlador del sistema.

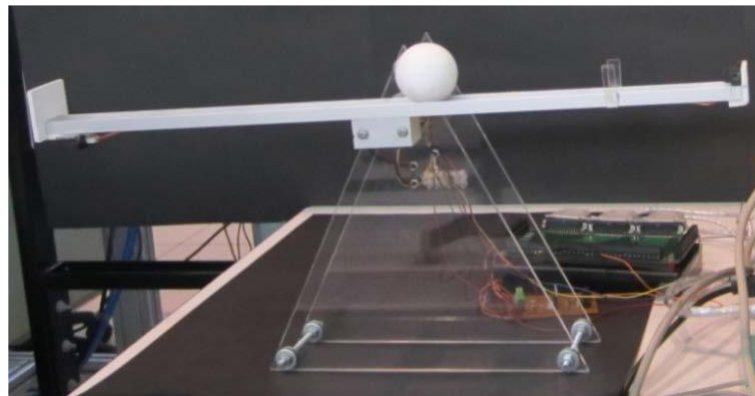


Figura 2. Módulo educativo para el control del sistema bola y varilla

Fuente: Pontificia Universidad Católica del Perú. Por: Pavel Meneses Morales y Henry Daniel Zafra Siancas.

Aporte: Analiza prestaciones de un módulo de control educativo para alumnos de pregrado que lleven asignaturas de control, además estudia la manera óptima de controlar el sistema de naturaleza no lineal e inestable.

Diseño e implementación de controladores PID industriales.

Tesis presentada por el Ing. Aníbal Arturo Parra Quispe para optar el grado de maestro en la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima – Perú en el año 2007. [3] La finalidad de la tesis fue brindar un aporte en el campo de la automatización de procesos, haciendo una descripción de los controladores PID, control adaptativo y control difuso. Presentando como conclusión de la tesis un resultado satisfactorio del PID mejorado en aplicaciones como: nivel de agua de un tanque, temperatura del tanque, posición angular de un brazo robótico de 1 grado de libertad de referencia fija y referencia variable.

Aporte: Brinda información de los controladores PID, y PID discreto describiendo sus comportamientos, además de brindar información sobre la sintonización de controladores PID.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Contribución al diseño y sintonía de controladores PID discretos en sistemas muestreados de forma no convencional.

Tesis doctoral desarrollado por la Lic. Yolanda Cerezo López, en la Universidad Nacional de Educación a Distancia de Madrid – España en el año 2011. [4] La finalidad fue brindar un aporte para el diseño de controladores discretos. Propone hacer un análisis, diseño y control de sistemas de muestreo no convencionales para sistemas de control digitales, revisa distintos métodos de modelado de sistemas, estudia las modificaciones de estructuras convencionales de controladores PID discretos, además de proponer un método de sintonía práctico de controladores PID.

Aporte: Brinda información sobre la sintonía de controladores discretos en general y su correcto desarrollo.

Diseño y construcción de tres módulos didácticos para medición y control de temperatura

Trabajo de investigación realizado por el Ing. Jorge Daniel Jiménez Benalcázar y el Ing. Hugo Armando Benavides Caguasango en la Universidad Técnica del Norte de San Miguel de Ibarra – Ecuador. [5] Este trabajo presenta el control de 3 módulos de temperatura con una única interfaz hombre – máquina, todo ello con la finalidad de brindar un equipo donde se pueda simular el comportamiento de un sistema industrial en los cursos de instrumentación electrónica y control automático de la universidad.

Aporte: Realiza el análisis del comportamiento de los sistemas de control de temperatura, brinda información de cómo abordar cada etapa y elemento de un sistema.

2.2. Estado del arte

Desde los orígenes del control automático, los sistemas neumáticos formaron parte importante de investigación debido a su naturaleza y dinámica, esto conllevó a que varios centros de investigación y empresas logren avances

significativos en los sistemas de levitación neumática. A continuación, se presentarán las investigaciones más significativas.

Planta robusta de levitación neumática para investigación y formación en control y visión artificial.

Proyecto desarrollado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. [6] Consta de tres tubos cilíndricos con una esfera en el interior de cada uno, los cuales deben estabilizarse a una altura determinada. El sistema usa una cámara como sensor para poder estimar la posición de la esfera, además de hacer uso de lógica difusa para su control, la variable de entrada del sistema es la energía interna que se estima partir de las aceleraciones de las esferas.



Figura 3. Planta robusta de levitación neumática

Fuente: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Por: Diego Bello y otros.

Diseño, construcción y control de un sistema de levitación neumática

En este proyecto los autores buscaron implementar un sistema de levitación neumática con la finalidad de probar controladores clásicos diseñados con distintos métodos. Además de presentar un análisis matemático básico del comportamiento de la esfera en el tubo, esto con la finalidad de hacer más accesible información sobre la dinámica del sistema. Este proyecto fue implementado en la Universidad de la Sierra Sur en Oaxaca – México. [7]

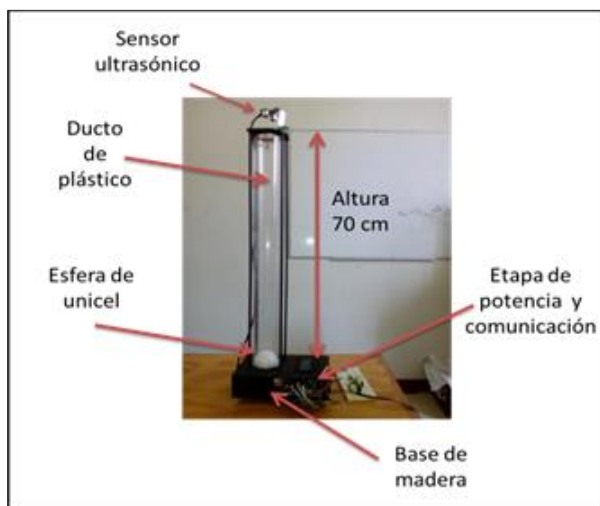


Figura 4. Sistema de levitación neumática de la Universidad de la Sierra Sur
 Fuente: Universidad de la Sierra Sur en Oaxaca. Por: Irving Ulises Hernández Miguel y otros.

Implementación de neurocontroladores en línea, tres configuraciones, tres plantas

Este es un proyecto desarrollado con la finalidad de poner a prueba los controladores basados en redes neuronales, para ellos se usaron 3 plantas distintas, de complejidad básica, intermedia y compleja. Siendo: un circuito RC (*resistivo - capacitivo*), un motor DC y un sistema de levitación neumática respectivamente. Se escogió este último debido a su naturaleza (*no lineal e inestable*). [8]

Se analizó la dinámica de la planta de levitación neumática, y en el informe se manifiesta que: “Una dificultad adicional es el tiempo de respuesta del sistema”.

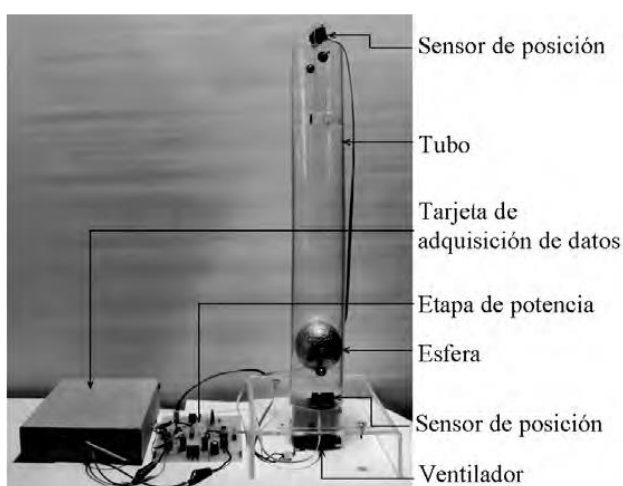


Figura 5. Sistema tubo – esfera de levitación neumática con control basado en red neuronal

Fuente: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Por: José Danilo Rairán Antolines y otros.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Levitación

La levitación se define como la acción de elevar y mantener un cuerpo en el espacio sin la presencia de contacto o fuerzas físicas conocidas.

“Levitar: Dicho de una persona o de una cosa: Elevarse en el espacio sin intervención de agentes físicos conocidos.” – RAE

Dentro de la ingeniería y de las ramas técnicas de la ciencia, la levitación se entiende como la acción de elevar y mantener un cuerpo por la acción de una fuerza, la levitación se clasifica dependiendo de qué tipo de fuerza es la que provoca la elevación del cuerpo. Algunas de estas son:

- ✓ **Levitación Magnética:** Es el efecto de hacer levitar un cuerpo el principio de repulsión que tienen dos polos de igual carga magnética, o del carácter metálico del cuerpo.
- ✓ **Levitación Neumática:** es el efecto de elevar un cuerpo generando un flujo de aire que genere un arrastre, la dinámica de la levitación neumática varía dependiendo del perfil y forma del cuerpo que levita.
- ✓ **Levitación Acústica:** es el efecto de capturar una partícula en un punto determinado del espacio mediante ondas sonoras que generan repulsión y atracción.

Para el presente trabajo debemos comprender el fundamento teórico de la levitación neumática.

2.3.2. Sistema de levitación neumática tubo – esfera

El sistema consiste en un tubo cilíndrico vertical dentro del cual se desliza una esfera que se desplaza por el flujo de aire producido por un ventilador.

El sistema se comporta en función a tres fuerzas: la fuerza de gravedad, la fuerza de arrastre y la fuerza de gradiente de presión. La gravedad ejerce fuerza hacia la tierra (*abajo*). La fuerza de arrastre va en dirección a la velocidad del cuerpo. La fuerza de la gradiente de presión apunta en la dirección de presión más baja de acuerdo con la ley de Bernoulli. Para que ocurra la levitación, la fuerza de arrastre debe ser lo suficientemente grande como para contrarrestar la gravedad y la fuerza de la gradiente de presión. [9]

Además la disposición de elementos para el control, como la posición del sensor y actuador, dependen del diseño. Y se debe tener en cuenta ciertas condiciones para dichos elementos. Es por ello que a continuación, se realiza un análisis de las bases matemáticas del sistema, así como también de los elementos que componen el sistema y sus características.

2.3.3. Principio matemático del sistema de levitación neumática

Los principios matemáticos que rigen al sistema dependen de tres factores principalmente: la geometría y aerodinámica del cuerpo contenido en el tubo, la velocidad del fluido y la presión generada al interior del tubo.

a. Aerodinámica de la esfera

La geometría de un cuerpo influye en su comportamiento aerodinámico, por lo que desde un punto de vista aerodinámico la resistencia de una esfera es media.

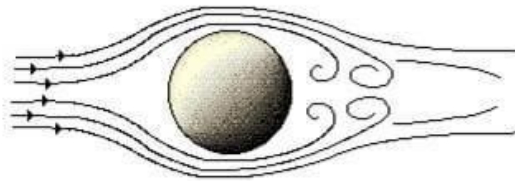


Figura 6. Resistencia aerodinámica de la esfera

Fuente: Grupo CARMAN.

Dentro de un tubo se debe tener en cuenta la presión dinámica y la velocidad del fluido que se explica con la ecuación de Bernoulli, este dice que a un incremento de la velocidad, la presión disminuye, a una altura constante. [10] Esto también se puede comprender con el principio de conservación de la energía, asumiendo una presión constante se puede afirmar que la energía potencial gravitatoria más la energía cinética se mantienen constantes.

$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{P}{D} + g \cdot h = constante \quad (1)$$

Siendo:

V: Velocidad del fluido

P: Presión

h: Altura

g: Gravedad

D: Densidad del fluido

Esta afirmación es muy importante en la dinámica del sistema cuando presenta un estado estacionario o estable.

Por otro lado la aerodinámica de la esfera y su comportamiento dentro del tubo se debe abordar con el coeficiente de arrastre, factor que depende únicamente de la geometría del cuerpo y se expresa con la siguiente fórmula:

$$C_d = \frac{2f_a}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (2)$$

Siendo:

v : Velocidad del cuerpo respecto al fluido

f_a : Fuerza de arrastre

A : Area de proyeccion del objeto

ρ : Densidad del objeto

De donde podemos despejar la fuerza de arrastre que genera el fluido en movimiento:

$$f_{a(t)} = \frac{1}{2} v^2 \rho C_d A \quad (3)$$

Además se conoce el coeficiente de arrastre de la esfera:










Shape	Drag Coefficient
Sphere → 	0.47
Half-sphere → 	0.42
Cone → 	0.50
Cube → 	1.05
Angled Cube → 	0.80
Long Cylinder → 	0.82
Short Cylinder → 	1.15
Streamlined Body → 	0.04
Streamlined Half-body → 	0.09

Figura 7. Coeficiente de arrastre de distintos cuerpos

Fuente: TheOtherJesse.

b. Leyes de Newton

El siguiente concepto a tener en cuenta para analizar el sistema de levitación tubo – esfera, son la primera y segunda ley de Newton.

✓ **Primera ley de Newton:**

La primera ley de Newton dicta que: “todos los cuerpos tienden a mantener un estado de reposo o MRU (*movimiento rectilíneo uniforme*), a menos que se les aplique fuerzas externas”. [11]

Esta ley muestra lo que ocurre con un cuerpo cuando la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre él son cero y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sum F = 0$$

Se debe tener en cuenta que este principio no determina la dinámica del cuerpo, por lo que se requiere de un punto o sistema de referencia. Es por ello que para cuantificar fenómenos físicos se prefiere el uso de sistemas no inerciales como sistemas de referencia. Por otro lado la ecuación (2), dice que para determinar la fuerza de arrastre se requiere de la velocidad de la esfera respecto a la velocidad del aire, siendo este último un sistema no inercial.

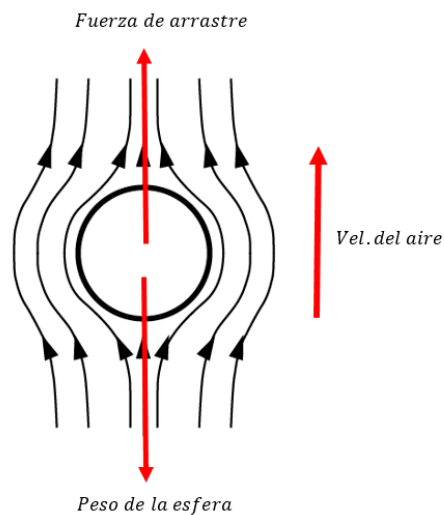


Figura 8. Fuerzas en la esfera

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la *figura 8* respecto a un observador en tierra, la sumatoria de fuerzas es cero cuando la esfera está en reposo, pero respecto al aire, que posee velocidad, la esfera se encontraría en movimiento, siendo: $v_{\text{esfera}} = -v_{\text{aire}}$ para el observador.

✓ **Segunda ley de Newton:**

La segunda ley describe el comportamiento de un cuerpo al que se le aplica una fuerza resultante distinta a cero.

La fuerza aplicada es la que causa un cambio en la velocidad del cuerpo, dicha variación tiene el mismo sentido y dirección que la fuerza, además el factor que relaciona dichas variables es la masa.

[11] Y se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{F} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt}$$

Donde $m \cdot \vec{v}$ es el momento lineal también conocido como cantidad de movimiento, si se tiene en cuenta que la masa es constante se puede determinar:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= m \frac{d\vec{v}}{dt} \\ \vec{F} &= m \cdot \vec{a} \quad (4)\end{aligned}$$

Con la segunda ley de Newton podemos formular el comportamiento de la esfera teniendo en cuenta la fuerza resultante y la aceleración que experimenta.

2.3.4. Actuador

Este elemento es el encargado de generar la fuerza de arrastre en el sistema. Y sus características con muy importante ya que este será el elemento sobre el cual actuaremos para generar cambios en la planta. Al ser un sistema de levitación neumática el actuador correcto es un ventilador.

a. Ventilador Centrífugo:

Este tipo de ventilador genera un flujo de aire de manera perpendicular (90°). Es decir que el aire ingresa de manera paralela a su eje pero sale de modo perpendicular al mismo.



Figura 9. Ventilador centrifugo Industrial Atenas 380v 1/2 Hp 1400 Rpm

Fuente: Atenas ventilación.

Estos ventiladores son usados cuando se requiere potencia en un espacio reducido, es idóneo para aire acondicionado, refrigeración industrial, presurización de naves, etc. [12]

b. Ventilador de presión estática:

Este tipo de ventiladores tienen un comportamiento en función al principio de Pascal ($P = F/A$), se caracterizan por tener una relación inversamente proporcional entre el volumen de aire que desplazan y la presión estática que generan.

Son utilizados en entornos donde se generan fricciones, donde se busca que el aire desplazado atraviese objetos, ya que la presión generada debe compensar las pérdidas. [13]



Figura 10. Ventilador Corsair SP120

Fuente: Corsair.

c. Ventilador de flujo de aire:

Estos ventiladores logran hacer circular la mayor cantidad de aire, la relación directa entre el caudal de aire que puede dar este ventilador depende del área y del ángulo ataque de las aspas.



Figura 11. Ventilador Corsair AF140

Fuente: Corsair.

2.3.5. Sensor

El sensor es el encargado de proporcionar la información de la variable a controlar. En esta investigación la variable a medir es la posición. Por lo que un sensor de distancia es el elemento adecuado, ya que se busca determinar la posición de una esfera contenida en un tubo.

a. Ultrasonido:

Este tipo de sensores trabaja emitiendo una señal sonora de alta frecuencia y midiendo el tiempo que tarda en retornar la señal. Estos sensores son muy utilizados industrialmente ya que trabajan libres de roces mecánicos. [14]

Los sensores ultrasónicos son utilizados en la industria con distintos fines, como por ejemplo medir el flujo aprovechando el efecto Doppler. Otro uso común es el de medir distancia para el llenado de tanques, para esta finalidad se debe tener en cuenta ciertos criterios al momento de utilizarlos que son los siguientes:

✓ **Tipo de configuración:**

Con sistema de emisor/receptor en el mismo transductor: Este tipo de sensores debe emitir un pulso ultrasónico y bloquear su membrana para que se prepare a recibir el rebote con la misma membrana.

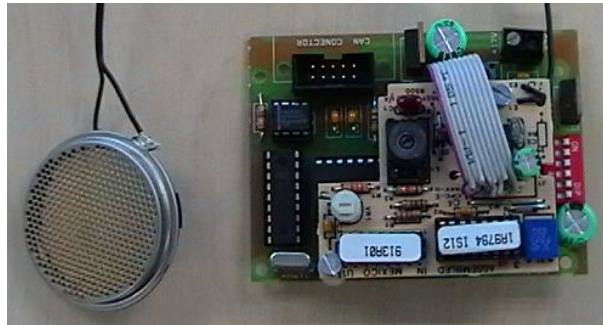


Figura 12. Sensor de distancia de una sola membrana

Fuente: Wiki de Robótica.

Con sistema de emisor/receptor separados: Estos sensores son los más utilizados por ser los más prácticos al momento de su aplicación, consisten en dos membranas una preparada para emitir el pulso ultrasónico y otra preparada para recibirlo.



Figura 13. Sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: Wiki de Robótica.

✓ **Ángulo de apertura:**

El ángulo de apertura básicamente es el ángulo de detección que delimita un área en el cual el sensor puede identificar un objeto.

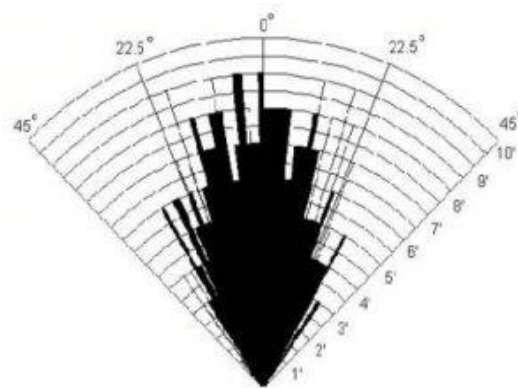


Figura 14. Ángulo de apertura del sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: Panamá Hitek.

Esta característica juega un papel muy importante, ya que dependiendo del entorno donde se use, se pueden generar distintos fenómenos como por ejemplo:

- Cross-talking: donde un sensor recibe la onda emitida por otro sensor, este fenómeno es más frecuente en entornos abiertos.
- Refracción: este fenómeno sucede cuando el objeto a detectar tiene una superficie con cierto grado de inclinación o curvatura que genera que la onda ultrasónica se desvíe y no retorne al sensor.
- Patrón de interferencia: sucede cuando el sensor trabaja acompañado de otros sensores ultrasónicos o donde el sensor trabaje en un entorno estrecho que genera que las ondas sonoras interfieran unas con otras generando un patrón de

interferencia sonora. Este fenómeno se suscita si chocan dos ondas de la misma frecuencia.

Algunas consideraciones:

- Los sensores ultrasonidos deben trabajar en un fluido y no en condiciones de vacío.
- Tiene muy poca variación con la humedad y es independiente de la presión y la altitud.

b. Infrarrojo:

Los sensores infrarrojos son generalmente utilizados para la detección de objetos, al igual que los sensores ultrasónicos. Estos sensores son especialmente diseñados para medición de distancias, y son conocidos como sensores SHARP.

Existen varios fabricantes de sensores SHARP, donde 3 son los principales modelos y se clasifican por su rango de medición, estos son:

- GP2Y0A21: rango de 10 a 80 cm
- GP2Y0A02: rango de 20 a 150 cm
- GP2Y0A710: rango de 100 a 550 cm

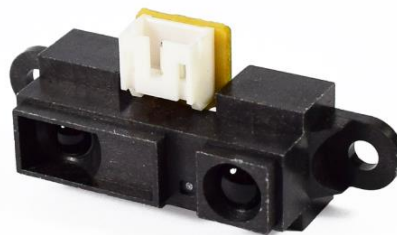


Figura 15. Sensor Infrarrojo de distancia SHARP GP2Y0A21

Fuente: Naylamp Mechatronics.

Se debe tener en cuenta el comportamiento del sensor SHARP al momento de usarlo. La salida de voltaje tiene una relación exponencial con la distancia al objeto que está detectado. Por lo que se debe analizar su comportamiento, el cual se presenta en la *figura 16*.

Algunas consideraciones:

- Estos sensores son muy susceptibles a la luz ambiente, ya que el sol también emite radiación infrarroja.
- Son poco estables en sus lecturas por lo que se requiere el diseño de filtros.
- Su uso se recomienda en entornos sin variación lumínica y en condiciones de vacío.

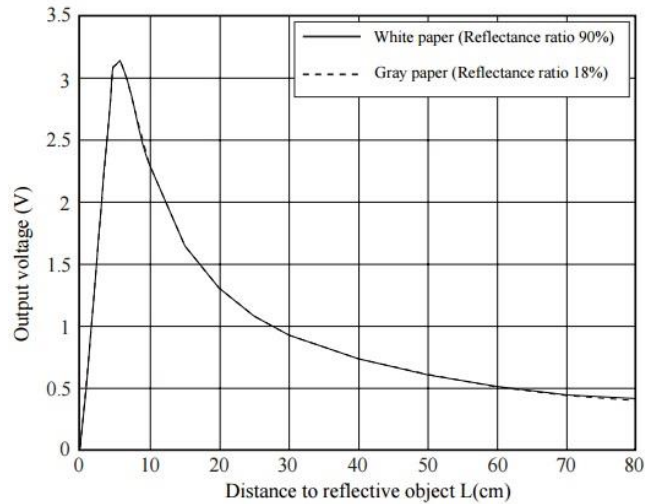


Figura 16. Grafica de distancia Vs. Voltaje del SHARP GP2Y0A21

Fuente: Naylamp Mechatronics blogs.

2.3.6. Controlador

a. Arduino:

Es una plataforma de desarrollo de código abierto, su mercado objetivo es muy versátil desde colegios hasta empresas pasando por universidades. Los productos que ofrecen están basados en los microcontroladores Atmel en su mayoría, dentro de su catálogo de productos existen plataformas basadas en controladores como: el Cyclone 10 FPGA de Intel y el SAMD21 de microchip. [15]

Algunos de los productos más resaltantes de Arduino son:

✓ **Arduino UNO:**

Es una placa basada en el ATmega328P, UNO viene del italiano que hace referencia al primero ya que esta placa se eligió para el lanzamiento del software 1.0 de Arduino.



Figura 17. Arduino UNO

Fuente: Arduino Products.

Las características principales de esta tarjeta se muestran a continuación:

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pins de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
PWM Digital I/O Pins	6
Clavijas de entrada analógica	6
Corriente DC por Pin de E/S	20 mA
Corriente DC para 3.3V Pin	50 mA
Memoria flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 KB utilizados por el cargador de arranque.
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
LED incorporado	13
Longitud	68.6 mm
Anchura	53.4 mm
Peso	25 g

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Arduino UNO

Fuente: Arduino Products.

✓ **Arduino NANO:**

Es una tarjeta basada en el ATmega328P, tiene prestaciones similares al Arduino UNO, su principal característica es su diseño compacto, y su conexión mini-USB.

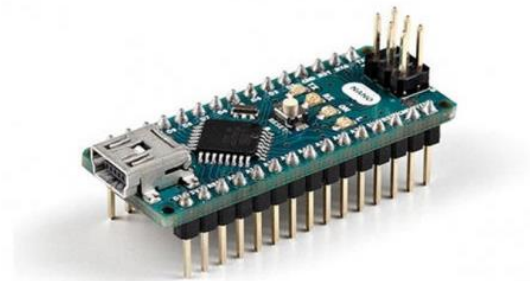


Figura 18. Arduino NANO

Fuente: Arduino Products.

Las características principales del Arduino NANO se muestran a continuación:

Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de funcionamiento	5 V
Memoria flash	32 KB de los cuales 2 KB utilizados por el gestor de arranque.
SRAM	2 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pines analógicos de entrada	8
EEPROM	1 KB
Corriente DC por los pins de E/S	40 mA (pins de E/S)
Voltaje de entrada	7-12 V
Pins de E/S digitales	22 (6 de los cuales son PWM)
Salida PWM	6
Consumo de corriente	19 mA
Tamaño de PCB	18 x 45 mm
Peso	7 g

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Arduino NANO

Fuente: Arduino Products.

✓ **Arduino MEGA 2560:**

El Arduino MEGA está basado en el ATmega2560 de ahí su nombre, es una placa más evolucionada con mayor cantidad de entradas y salidas, esta placa es más utilizada en aplicaciones que requieran un mayor número de puertos de comunicación o pines de entradas y salidas.



Figura 19. Arduino MEGA 2560

Fuente: Arduino Products.

Sus características son las siguientes:

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V

Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pins de E/S digitales	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Clavijas de entrada analógica	16
Corriente DC por Pin de E/S	20 mA
Corriente DC para 3.3V Pin	50 mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB utilizados por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED incorporado	13
Longitud	101.52 mm
Anchura	53.3 mm
Peso	37 g

Tabla 3. Especificaciones técnicas del Arduino MEGA 2560

Fuente: Arduino Products.

✓ **Arduino DUE:**

Es una placa basada en la CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Es la primera placa que tiene un núcleo de 32 bits tiene un reloj de 84Mhz, está diseñada para trabajos más complejos que exigen mayor capacidad de procesamiento, a diferencia de la mayoría de placas de Arduino, esta tolera un máximo de 3.3V de entrada y salida por sus pines.



Figura 20. Arduino DUE

Fuente: Arduino Products.

Sus especificaciones son las siguientes:

Microcontrolador	AT91SAM3X8E
------------------	-------------

Tensión de funcionamiento	3.3V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-16V
Pins de E/S digitales	54 (de los cuales 12 proporcionan salida PWM)
Clavijas de entrada analógica	12
Pins de salida analógica	2 (DAC)
Corriente de salida de CC total en todas las líneas de E/S	130 mA
Corriente DC para 3.3V Pin	800 mA
Corriente DC para 5V Pin	800 mA
Memoria flash	512 KB todos disponibles para las aplicaciones de usuario.
SRAM	96 KB (dos bancos: 64KB y 32KB)
Velocidad de reloj	84 MHz
Longitud	101.52 mm
Anchura	53.3 mm
Peso	36 g

Tabla 4. Especificaciones técnicas del Arduino DUE

Fuente: Arduino Products.

b. Raspberry Pi:

Raspberry en si es una fundación con sede en Reino Unido con el objetivo de hacer llegar a todas partes del mundo la tecnología digital, para ello ofrecen computadoras de bajo costo, con sus productos fomentan la educación en computación. [16] Los productos de Raspberry Pi son más reconocidos como computadores que como controladores pero son ampliamente utilizados para proyectos de prototipado, algunos de sus productos son:

✓ **Raspberry Pi 3 Modelo B:**

Es el modelo más popular en el último año, este fue el reemplazo del Raspberry Pi 2 en el 2016.



Figura 21. Raspberry Pi 3 Modelo B

Fuente: Raspberrypi.org

Las especificaciones técnicas de este modelo son las siguientes:

Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
1 GB de RAM
BCM43438 LAN inalámbrica y Bluetooth Low Energy (BLE) a bordo
100 Base Ethernet
GPIO extendido de 40 pines
4 puertos USB 2
Salida de 4 polos estéreo y puerto de video compuesto
HDMI de tamaño completo
Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi
Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi
Puerto micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos
Fuente de alimentación Micro USB conmutada actualizada de hasta 2.5A

Tabla 5. Especificaciones técnicas del Raspberry Pi 3 Modelo B

Fuente: Raspberrypi.org

✓ **Raspberry Pi ZERO:**

Es una placa más pequeña pero con prestaciones similares a los demás productos de Raspberry, este módulo es popular por su accesibilidad y portabilidad ya que su pequeño tamaño permite incluirlo de manera más fácil a los proyectos que requieran de un computador.

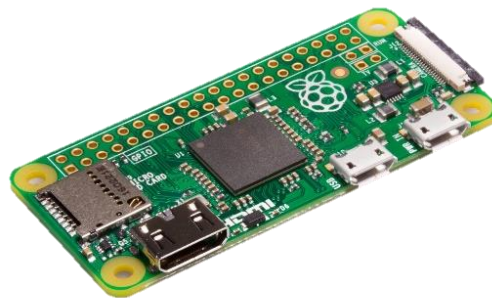


Figura 22. Raspberry Pi ZERO

Fuente: Raspberrypi.org

Las especificaciones técnicas del Raspberry Pi ZERO son:

CPU de 1 GHz de un solo núcleo
512 MB de RAM
Mini puerto HDMI
Puerto micro USB OTG
Alimentación micro USB
Cabezal de 40 pines compatible con HAT

Video compuesto y encabezado de reinicio
--

Conector de cámara CSI (solo v1.3)

Tabla 6. Especificaciones técnicas del Raspberry Pi ZERO

Fuente: Raspberrypi.org

c. Microcontrolador PIC:

Los microcontroladores PIC son productos de Microchip Technology Inc. Esta empresa clasifica a sus productos en 4, siendo 3 MCU (*microcontroladores*) y 1 MPU (*Microprocesador*).

- MCU 8bits, MCU 16 bits, MCU 32 bits y MPU 32 bits.

La gama de productos que ofrece es cuantiosa es por esto que solo mencionaremos aquellos que son opciones viables para cumplir el objetivo de la presente investigación.

✓ **PIC16F18875:**

Este microcontrolador presenta periféricos análogos independientes y periféricos de comunicación.



Figura 23. Microcontrolador PIC16F18875

Fuente: Microchip design centers

Algunas de sus características son:

Núcleo mejorado de gama media con 49 instrucciones, 16 niveles de pila
Oscilador interno ajustable (hasta 32MHz)
Pin Periférico Select (PPS)
2x PWMs de 10 bits
5x Captura, comparación, PWM (CCP)
Generador de forma de onda complementaria (CWG)
Oscilador controlado numéricamente (NCO)
Controlador lógico configurable 4x (CLC)
ADC de 10 bits con computación (ADC 2)
Convertidor digital a analógico de 5 bits (DAC)
Modulador de señal de datos (DSM)
Detección de Cruce por Cero (ZCD)
Verificación de redundancia cíclica (CRC / SCAN)
Reloj temporizador de vigilancia (WWDT)
Reinicio de encendido / apagado mejorado

Restablecimiento de baja potencia de baja potencia (LPBOR)
Restablecimiento de Brown-Out programable (BOR)
Programación en serie en circuito (ICSP)
PIC16LF18875 (1.8V - 3.6V)
PIC16F18875 (2.3V - 5.5V)

Tabla 7. Especificaciones Técnicas del Microcontrolador PIC16F18875

Fuente: Microchip design centers

Este microcontrolador es mencionado especialmente porque es compatible con otro producto de microchip que es el: “Curiosity High Pin Count (HPC) Development Board”. [17]

Esta es una placa de desarrollo que presenta un diseño integrado por lo que no se requieren de componentes ni accesorios externos para dar uso al microcontrolador. El código de producto de esta placa es: DM164136.

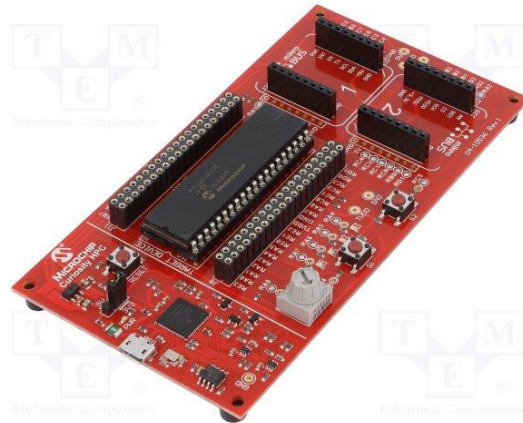


Figura 24. Curiosity High Pin Count (HPC) Development Board DM164136

Fuente: Microchip design centers

Esta placa de desarrollo admite controladores de 28 ó 40 pines. Presenta un conector mini-USB integrado y es completamente compatible con el MPLAB X IDE. [18]

d. IC op-amp:

Estos componentes electrónicos IC (*Integrated Circuit*) o circuitos integrados son conocidos como Op-amps (*operational amplifier*). Estos dispositivos fueron creados a partir de tubos de vacío en sus primeras versiones para las computadoras análogas, su función era realizar operaciones matemáticas (*suma, resta, multiplicación, etc.*) de ahí el nombre de “operacionales”.

Estos componentes electrónicos son mostrados en este apartado ya que fueron ampliamente estudiados en la ingeniería de control como dispositivos que permitan implementar circuitos de operación y cálculo para poder controlar sistemas industriales. Debido a que la ingeniería de control tiene un vínculo fuerte con el análisis matemático, estos componentes electrónicos fueron y son usados hasta la actualidad para la implementación de controladores.

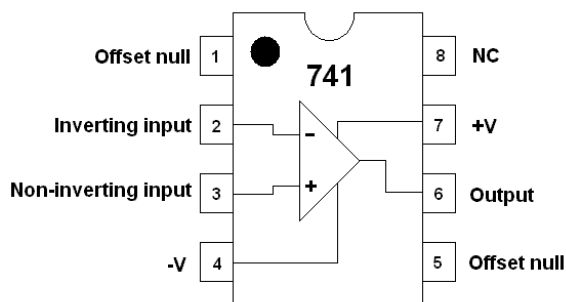


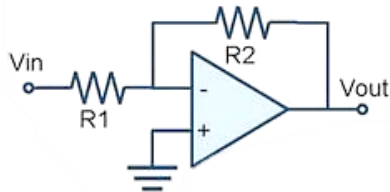
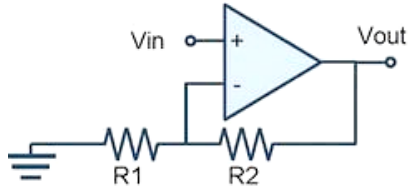
Figura 25. CI Op-amp 741

Fuente: ElectroSome.

Este componente en términos de diseño de controladores, se diferencia de los demás ya mencionados en que es de naturaleza analógica.

Las características de este componente varían según las prestaciones, precisión y/o robustez según el modelo y fabricante ya que su análisis y configuraciones para su uso, se pueden explicar matemáticamente y generalizar para todo CI Op-amp.

Algunas configuraciones de uso son:

Amplificador Inversor.	 $V_{out} = -V_{in} \frac{R2}{R1}$
Amplificador No Inversor.	 $V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$

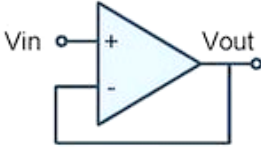
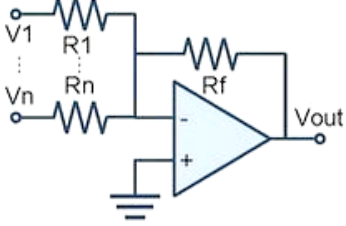
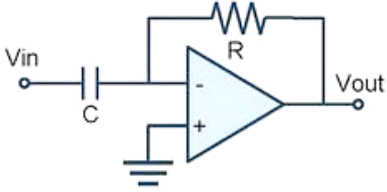
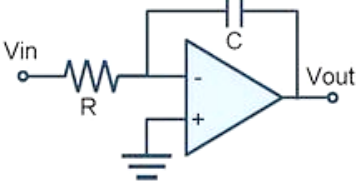
Seguidor de Voltaje.	 $V_{out} = V_{in}$
Sumador.	 $V_{out} = R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$
Derivador.	 $V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$
Integrador.	 $V_{out} = - \left(\frac{1}{R \times C} \right) V_{in} dt$ $V_{out} = - \left(\frac{1}{RC} \right) \int V_{in} dt$

Tabla 8. Configuraciones básicas de los Amplificadores Operacionales

Fuente: ElectroSome.

2.3.7. Técnicas de control

a. Control moderno:

Para hablar del control moderno y su importancia en este trabajo debemos revisar un poco de su historia y evolución.

El primer sistema de importancia en la ingeniería de control es el regulador de velocidad centrífugo de James Watt, desarrollado en

1788 que en la actualidad forma parte del sistema de control clásico debido a su trabajo netamente mecánico de una entrada y una salida. Más adelante Minorsky en 1922 logró demostrar que se podía determinar la estabilidad de los sistemas a partir de ecuaciones diferenciales y Nyquist con sus aportes brindó un método para determinar la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado basándose en la respuesta del sistema en lazo abierto. En los años cuarenta muchos sistemas utilizaban el método de control PID y conjuntamente Ziegler y Nichols establecieron los métodos de sintonización de estos controladores, a principios de los años cincuenta se introdujo el método del análisis del lugar geométrico de las raíces establecido por parte de Evans. [19] El aporte más importante de este momento es el desarrollo de métodos de análisis de los sistemas reales y sobre todo los aportes a los controladores PID.

b. Control PID:

Esta técnica de control es muy popular en los sistemas de regulación continua y en diseño de sistemas de control. Su principal ventaja, es que se trata de un controlador no tan complejo de analizar y de implementar con conocimientos básicos de análisis matemático, es muy popular industrialmente ya que es simple de entender la influencia e importancia de sus componentes, los cuales son: la acción Proporcional, Integral y Derivativa. El control PID se basa en su entrada que es el error, y se expresa como la diferencia entre el punto de consigna y el valor actual de la salida de la planta.

La ecuación de control PID en dominio de S (*dominio de Laplace*) se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5)$$

Siendo:

$U(s)$: Salida del controlador

$E(s)$: Entrada del controlador (error)

K_p : Constante de acción proporcional

T_i : Constante de tiempo integral

T_d : Constante de tiempo derivativo

Dentro de un diagrama de bloques se puede contemplar de la siguiente manera:

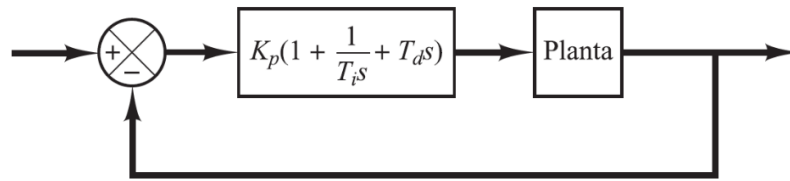


Figura 26. Diagrama de control PID

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata

Teniendo en cuenta que:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad y \quad K_d = K_p \cdot T_d$$

De la ecuación (5) se obtiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$

$$U(s) = K_p E(s) + K_i \frac{1}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad (6)$$

La ecuación (6), $U(s)$ representa la salida del controlador en función del error $E(s)$ pero esta ecuación está en el dominio de "S", por lo que al momento de implementarlo ya sea en un circuito o en un programa, su lógica no es muy clara debido a que los sistemas reales trabajan en función al tiempo.

De la ecuación (6) aplicando transformada inversa a cada término de control, se obtiene:

- Término proporcional:

$$P = \mathcal{L}^{-1}\{K_p \cdot E(s)\}$$

$$P = K_p \cdot \mathcal{L}^{-1}\{E(s)\}$$

$$P = K_p \cdot e(t)$$

- Término integral:

$$I = \mathcal{L}^{-1}\left\{K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s)\right\}$$

$$I = K_i \cdot \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s} \cdot E(s)\right\}$$

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt$$

- Término derivativo:

$$D = \mathcal{L}^{-1}\{K_d \cdot S \cdot E(s)\}$$

$$D = K_d \cdot \mathcal{L}^{-1}\{S \cdot E(s)\}$$

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Por lo tanto la ecuación de control PID en el dominio del tiempo se expresa de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Esta técnica de control no necesariamente requiere del uso de los tres términos de control a la vez, estos controladores pueden ser tipo P, PI, PD, PID pero se debe tener en cuenta que efectos tiene cada uno de ellos en el comportamiento de la planta o sistema. [20] A continuación, se analiza el comportamiento de cada término del control PID.

✓ **Control Proporcional (P):**

En el control tipo P, la salida del controlador es proporcional al error, y se expresa de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

El factor K_p es el que determina el comportamiento del sistema, con un factor bajo, la respuesta no será la suficiente para alcanzar la referencia y existirá un offset permanente con un valor demasiado elevado, el sistema responderá más rápido pero con oscilaciones y un tiempo asentamiento elevado pero con un offset más bajo. Una de las principales desventajas de este control es la presencia del offset.

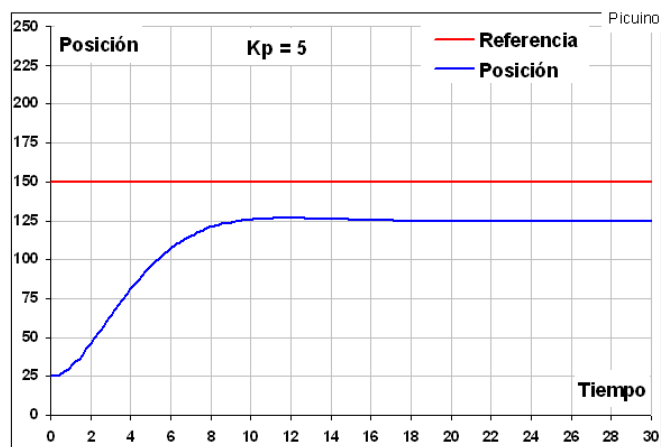


Figura 27. Respuesta del control proporcional

Fuente: Pícuino

Generalmente, al usar este control se usa un factor correctivo para compensar el offset, pero esto solo funciona para una única referencia, ya que al cambiar el punto de consigna el control proporcional no puede compensar dicha variación.

✓ **Control Proporcional – Integral (PI):**

El control PI funciona a partir del control proporcional siendo el término integral el que compensa el problema del offset ya que el valor integral crece cuando mayor es el tiempo que permanece el error, de ahí su otro nombre: “control de acción correctiva”. Su ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_i \int_0^t e_{(t)} dt$$

El factor K_i es el factor de respuesta de la acción integral, cuando este tiene un valor bajo, el tiempo de estabilización será elevado, pero cuando es muy elevado se generan oscilaciones antes de conseguir la estabilidad.

Una característica a tener en cuenta en este tipo de control es el sobreimpulso que dependerá de la capacidad de la planta, generalmente se busca un valor de sobreimpulso no mayor a 30%.

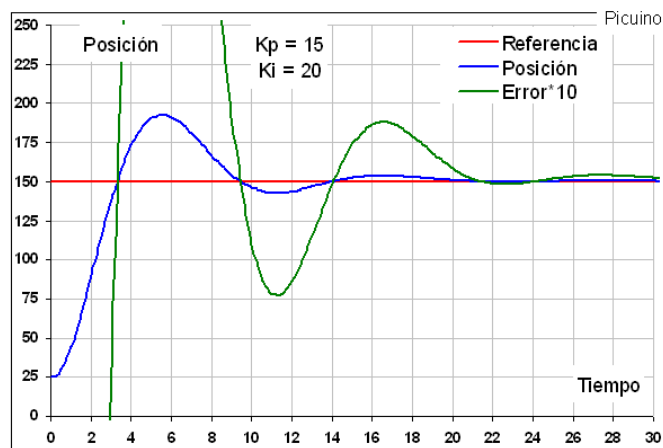


Figura 28. Respuesta del control proporcional – integral

Fuente: Picuino

✓ **Control Proporcional – Derivativo (PD):**

El control PD al igual que el control PI funciona a partir del control proporcional, este control se basa en una acción proporcional elevada que genere oscilaciones entorno a la referencia, debido a que la acción derivativa atenúa dichas oscilaciones. La presencia de la parte

derivativa da lugar a una banda de acción proporcional mayor. Su ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_d \frac{de_{(t)}}{dt}$$

El término derivativo mejora la respuesta ante la presencia de perturbaciones ya que se anticipa a los cambios, esto lo logra teniendo en cuenta el error pasado o anterior, de ahí su nombre de: “*control de acción anticipativa*”.

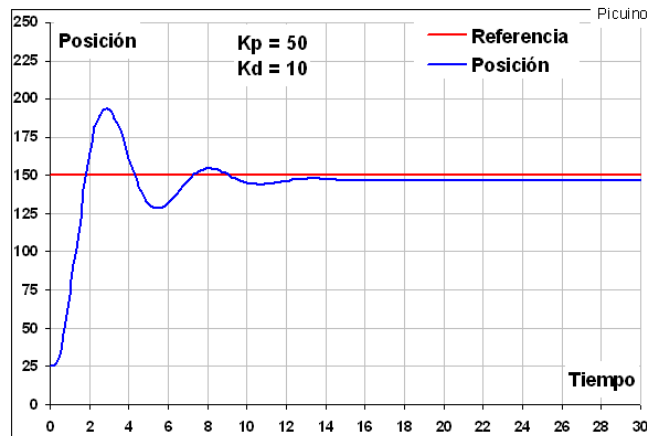


Figura 29. Respuesta del control proporcional – derivativo

Fuente: Picuino

✓ **Control proporcional – integral – derivativo (PID):**

El control PID es el que combina las tres acciones presentadas anteriormente, la ecuación (7) es su ecuación general, este control en lo ideal debe ser de respuesta rápida, tener una señal de error igual a cero y ser estable. Esto se consigue eligiendo los valores adecuados de K_p , K_i y K_d . Para ello se utilizan los denominados métodos de sintonización o reglas de Ziegler-Nichols.

c. Reglas de Ziegler-Nichols para la sintonía de controladores PID

✓ **Primer método basado en la respuesta escalón:**

Este método parte de obtener la curva de respuesta del sistema ya sea por una simulación o de un sistema real. La curva de respuesta debe tener forma de S, si en caso de obtener los datos de un sistema de forma experimental no se puede determinar el punto de inflexión de la curva S este método no puede ser aplicado. [19]

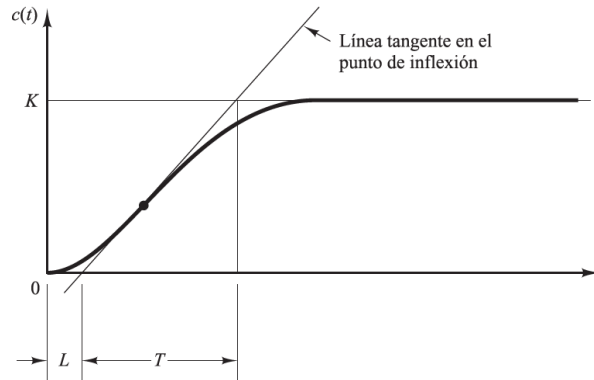


Figura 30. Curva S de respuesta

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

Con la curva obtenida, se traza una línea tangente al punto de inflexión, esto proporciona dos parámetros importantes:

L : Tiempo de retraso

T : Constante de tiempo

Una vez obtenidos los dos parámetros se usa la siguiente tabla:

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 9. Tabla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

✓ **Segundo método basado en la ganancia crítica:**

Se debe comenzar con $K_p = 0$, e ir incrementándolo poco a poco hasta que el sistema de una respuesta con oscilaciones permanentes y sostenidas. El valor de K_p con el que cumpla esta condición es la ganancia crítica K_{cr} , si en caso el sistema no presenta dichos requisitos para ningún valor de K_p este método no se puede usar.

El segundo paso es determinar el periodo crítico P_{cr} que corresponde al periodo de las oscilaciones sostenidas con K_{cr} . [19]

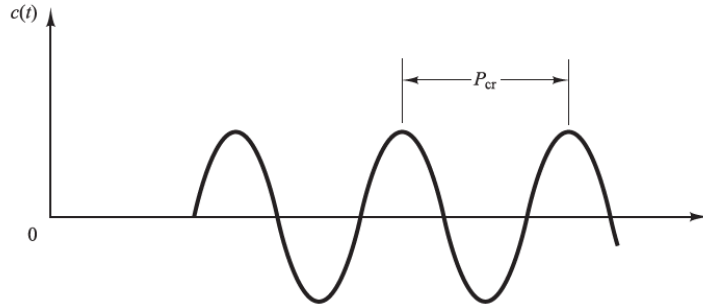


Figura 31. Respuesta con oscilaciones sostenidas
Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

Con los dos valores críticos obtenidos se utiliza la siguiente tabla:

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

Tabla 10. Tabla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en La ganancia crítica.

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

d. Control PID discreto:

Para comprender el control PID discreto se debe entender las restricciones de los dispositivos digitales, a los que les lleva un periodo de tiempo cumplir un ciclo de programa.

Para obtener la ecuación de PID discreto, partimos de la ecuación (3).

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_i \int_0^t e_{(t)} dt + K_d \frac{de_{(t)}}{dt}$$

Donde cada término de control se expresa en términos discretos, siendo:

$$u_k = K_p \cdot e_k + K_i \sum_{k=0}^n e_k \Delta t + K_d \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad (8)$$

Siendo:

k : Termino k – esimo

Δe : variacion del error

Δt : tiempo discreto

Donde:

$$\Delta e = e_k - e_{k-1}$$

$$\Delta t = t_k - t_{k-1}$$

El análisis del comportamiento de un sistema discreto en el dominio de los complejos se logra con la transformada z, pero este ha perdido importancia, dado que para la implementación de los controladores, se requiere de las ecuaciones en el dominio del tiempo y esta es indiferente al análisis en el dominio de “s” o “z”. [4]

e. Control óptimo:

Los controladores con retroalimentación son los más conocidos dentro de la ingeniería de control debido a su versatilidad y su relativa confiabilidad. Para comprender la importancia del control óptimo debemos entender el significado de óptimo en el contexto de la ingeniería de control.

“Óptimo: Sumamente bueno, que no puede ser mejor.” – RAE

La palabra óptimo es un término muy subjetivo debido a que generalmente se relaciona la dinámica del sistema con un sistema inmejorable o incluso que el planteamiento es el mejor posible, pero en el campo de la ingeniería de control para decir que un sistema es óptimo debemos asociar el comportamiento del sistema a otro que se podría considerar ideal, vinculando ambos y buscando minimizar el valor de una función de coste. [21]

✓ ***Función de coste***

También llamado índice de performance es una función que refleja cómo se comporta el sistema, a modo de analogía se puede usar el criterio IAE (*Integral Absolute Error*).

$$J = \int_0^t |e(t)| dt$$

Donde, si el error es minimizado, la función de coste será mínima en el tiempo, lo que indica que la respuesta del sistema es la buena. Otro criterio podría ser el ITAE (*Integral Time Absolute Error*).

$$J = \int_0^t |e(t)| \cdot t dt$$

También se podrían usar los índices cuadráticos:

$$J = \int_0^t e(t)^2 dt$$

Se puede notar en todos los casos anteriores que se integra la solución positiva del error, estos ejemplos son funciones de comportamiento ideal donde se conoce como evoluciona el error y así poder aplicar una penalización, si se diseña un controlador que minimice las funciones de coste presentadas, es probable que se generen comportamientos de incompatibilidad. Una función de coste se puede componer no solo del error sino también de la salida, y este puede cambiar dependiendo de la respuesta y las restricciones del control. [21]

Una función de coste más desarrollada es:

$$J = \int_0^t (e_{(t)}^2 + \rho \cdot u_{(t)}^2) \cdot dt + e_{(tf)}^2$$

Donde: ρ es el factor de acción del cuadrado de la salida $u_{(t)}^2$ que compensa al cuadrado de error $e_{(t)}^2$ y $e_{(tf)}^2$ es el error final al cuadrado que penaliza la acción de integración.

Estas funciones de coste pueden ser analizadas con el sistema en funcionamiento para que tomen acciones de corrección sobre el sistema o pueden ser indicadores del comportamiento del sistema todo depender de cómo se diseñe el diagrama de control y que técnica de control óptimo se utilice.

f. Control LQR:

LQR (*Linear – quadratic regulator*) se entiende como: regulador lineal – cuadrático, es una técnica de control que consta de una serie de ecuaciones donde la función de coste es lineal.

En términos simples el control LQR consta de un controlador que se actualiza de manera automática para encontrar el mejor estado de control ante cada cambio o estado del sistema. [22] La función de coste se debe minimizar respecto a un modelo matemático previamente analizado. El controlador LQR se puede clasificar en cuatro que dependen del tiempo y de la naturaleza del controlador.

✓ **LQR de horizonte finito de tiempo continuo**

Para un tiempo $t \in [t_0, t_1]$.

Donde:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Y la función de coste es:

$$J = x^T_{(t_1)} \cdot Q_{(t_1)} \cdot x_{(t_1)} + \int_{t_0}^{t_1} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u + 2x^T \cdot N \cdot u) dt$$

Donde la salida del controlador es:

$$u = -K \cdot x$$

Y K es determinado por:

$$K = R^{-1}(B^T P_{(t)} + N^T)$$

Siendo $P_{(t)}$ el valor encontrado al resolver la ecuación diferencial de Riccati en tiempo continuo.

$$-P_{(t)} = Q + A^T P_{(t)} + P_{(t)} A - (P_{(t)} B + N) R^{-1} (B^T P_{(t)} + N^T)$$

✓ **LQR de horizonte infinito de tiempo continuo**

Para un sistema representado por:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Y la función de coste es:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u + 2x^T \cdot N \cdot u) dt$$

Donde la salida del controlador es:

$$u = -K \cdot x$$

Y K es determinado por:

$$K = R^{-1}(B^T P + N^T)$$

Siendo P el valor encontrado al resolver la ecuación diferencial de Riccati en tiempo continuo (CARE).

$$Q + A^T P + PA - (PB + N) R^{-1} (B^T P + N^T) = 0$$

✓ **LQR de horizonte finito de tiempo discreto**

Donde:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

Y la función de coste es:

$$J = x_N^T \cdot Q \cdot x_N + \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T \cdot Q \cdot x_k + u_k^T \cdot R \cdot u_k + 2x_k^T \cdot N \cdot u_k)$$

Donde la salida del controlador es:

$$u_k = -F_k \cdot x_k$$

Y F_k es determinado por:

$$F_k = (R + B^T P_{k+1} B)^{-1} (B^T P_{k+1} + N^T)$$

Siendo P_k se obtiene en cada ciclo de cálculo por la ecuación dinámica de Riccati.

$$P_{k-1} = Q + A^T P_k A - (A^T P_k B + N)(R + B^T P_k B)^{-1}(B^T P_k A + N^T)$$

✓ **LQR de horizonte infinito de tiempo discreto**

Para un sistema representado por:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

Y la función de coste es:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T \cdot Q \cdot x_k + u_k^T \cdot R \cdot u_k + 2x_k^T \cdot N \cdot u_k)$$

Donde la salida del controlador es:

$$u_k = -F_k \cdot x_k$$

Y F_k es determinado por:

$$F_k = (R + B^T P B)^{-1}(B^T P A + N^T)$$

Siendo P_k se obtiene de la solución positiva de la ecuación de Riccati de tiempo discreto (DARE).

$$P = Q + A^T P A - (A^T P B + N)(R + B^T P B)^{-1}(B^T P A + N^T)$$

En general:

A: Matriz de estado

B: Matriz de entrada

Q: Pesos de estado

R: Pesos de entrada de control

N: Matriz de estado final

u: Salida de control

K: Constante de control de tiempo continuo

F: Constante de control de tiempo discreto

g. Control MPC:

El control MPC (*Model predictive control*) se basa en introducir un modelo matemático que influya en el comportamiento del sistema, para que la planta pueda comportarse de manera homóloga el modelo introducido. El control se logra a partir de la estrategia del horizonte deslizante, el cálculo del comportamiento se aplica a futuro, por lo que primero se debe obtener el valor ideal a alcanzar y posteriormente la salida será aplicada al actuador. [23]

El control MPC se caracteriza por ser de horizonte de predicción errante. Además de que presentan técnicas de cálculo convencionales como:

✓ **MPC basado en Minimax**

Este control se basa en tomar múltiples opciones de evolución del sistema, es la técnica más compleja y óptima, su principal desventaja es que requiere una alta capacidad de procesamiento por parte del controlador.

✓ **MPC con ajuste de restricciones**

Esta técnica se basa en ajustar las salidas del controlador ante los cambios o perturbaciones.

✓ **MPC tubular**

Usa un modelo independiente y requiere de un mecanismo de retroalimentación, dado que su función no es estabilizar si no anticipar el comportamiento que debe cumplir el sistema.

✓ **MPC de múltiples etapas**

Se basa en la información de un grupo de muestras, dichas muestras ofrecen información del comportamiento del sistema ante perturbaciones, la desventaja de este sistema es que depende del número de variables en incertidumbre y del horizonte de predicción que depende del tiempo que se ejecuta el controlador.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del controlador dependen del modelo elegido a seguir, estos modelos deben corresponder a la naturaleza del sistema de lo contrario los modelos pueden generar incompatibilidad con el control. Un ejemplo de modelo a seguir es la ecuación de comportamiento del sistema de la *figura 32*.

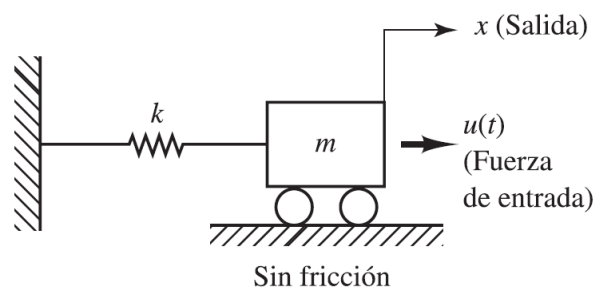


Figura 32. Sistema mecánico resorte – masa

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

Su función de transferencia se expresa de la siguiente manera:

$$G_{(s)} = \frac{1}{ms^2 + k}$$

Siendo este un modelo de referencia óptimo.

2.4. Definición de términos básicos

- **Actuador:** Es un componente con la capacidad de generar cambios en un sistema o planta. Generalmente, este dispositivo está contemplado dentro de la planta, por ello también se entiende como el elemento sobre el cual podemos tomar acciones para generar efectos o cambios en el sistema.
- **Algoritmo:** Es un conjunto o grupo de instrucciones ordenadas y bien definida cuya función es establecer cómo llegar a un estado final partiendo de un estado inicial.
- **Controlador:** se define como una lógica, ecuación, algoritmo o elemento que permite determinar y/o ajustar el comportamiento de un sistema.
- **Error estacionario:** Se conoce también como error en estado estable, y es una forma del error de control que se presenta cuando el error tiene un valor constante o estable que se relaciona con la respuesta del sistema.
- **Función de transferencia:** Se define como la relación entre la entrada y salida de un sistema o subsistema, en ingeniería de control generalmente se trabaja como una ecuación invariante en el tiempo que relaciona la entrada y salida.
- **Ingeniería de control:** Es una rama de la ingeniería que hace uso de la teoría de control diseñar e implementar lógicas de control que generen un comportamiento deseado a un sistema real.
- **Modelo matemático:** En el campo de la ingeniería de control se entiende como modelo matemático a una ecuación que describe el comportamiento de un fenómeno real.
- **Offset:** Hace referencia a la presencia de un error, pero a diferencia del error estacionario este es un error que no se logra compensar por parte del controlador y se considera su existencia a partir de que la respuesta consigue la estabilidad.
- **Planta:** En ingeniería de control se llama planta a cualquier objeto físico que se desea controlar (ej. *Brazo robótico, horno eléctrico, nave espacial, etc.*).
- **Punto de consigna:** También llamando valor reset o valor de referencia, es el valor que se desea obtener a la salida de la planta.

- **Sensor:** Es un componente que permite tomar medidas físicas, transformándola en otra variable como por ejemplo: voltaje, resistencia, capacitancia, etc.
- **Tiempo discreto:** Es un periodo de tiempo, hace referencia al tiempo que le lleva a un sistema digital cumplir un ciclo de trabajo.
- **Tiempo continuo:** Es el valor de tiempo que no presentan intervalos de muestreo, este término se usa al analizar la respuesta en sistemas continuos o analógicos.
- **Tiempo de estabilización:** También llamado tiempo de asentamiento es el lapso de tiempo en el que el sistema logra alcanzar una estabilidad.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Se deben mencionar que la tesis desarrollada es una investigación tecnológica, que se define como un diseño para la elaboración de materiales, productos, métodos, procesos, sistemas nuevos o mejorados, antes de su producción o uso comercial.

3.2. Resultados esperados

En la siguiente tabla se muestran los resultados esperados de la investigación, esto con el fin de alcanzar los objetivos.

N°	Objetivo	Resultado esperado
1	Diseñar un sistema de control de nivel de una esfera accionado por flujo de aire que permita desarrollar prácticas para la comprensión de la influencia de un controlador en el sistema.	El sistema a implementar debe presentar una estructura que permita el ingreso de las constantes de control por parte de un operario, y estos cambios se reflejen en la dinámica del sistema tubo – esfera, permitiendo comprender su influencia en el sistema.
2	Desarrollar el sistema de control que permita utilizar la respuesta de un modelo de control en su comportamiento.	Determinar y analizar un modelo de control que pueda ser compatible con el sistema de tubo – esfera para su aplicación dentro del controlador.
3	Desarrollar el algoritmo PID para el control de nivel de una esfera basado en el análisis de las variables de control.	El diseño de control PID debe contemplar un análisis basado en las variables de control existentes según la tecnología seleccionada.
4	Diseñar el sistema de control que permita comprender la importancia de la tecnología seleccionada.	El controlador para el sistema debe ser implementado teniendo en cuenta el tipo de controlador (sea discreto o analógico).

5	Diseñar un módulo de control que permita evidenciar la relación entre la teoría de control y su aplicación directa.	La lógica de control a implementar permitirá comprender de manera directa la relación entre la teoría y la práctica.
---	---	--

Tabla 11. Tabla de resultados esperados.

Fuente: Elaboración propia

3.3. Metodología para el análisis y diseño de un sistema de control

Los pasos a seguir para el análisis y diseño de un sistema de control son:

1. Estudio del problema, teniendo en consideración cómo es que funcionan en la actualidad, el desempeño y las características de operación, de este modo aprovechar las características del sistema.
2. Determinar los requerimientos para la operación del sistema, lo cual se define con la necesidad a satisfacer.
3. Analizar y seleccionar la tecnología a usar (*sensores, actuadores, procesador, etc.*).
4. Diseño de la estructura de un prototipo con la finalidad de facilitar el análisis del sistema.
5. Se muestra el sistema con el diseño realizado y la tecnología seleccionada.
6. Comprobación del funcionamiento (*pruebas*).

La metodología se basa en la presentada en el libro “Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado” del autor Alí José Carrillo Paz, el cual detalla la importancia de los controladores y su construcción en distintos campos de la ingeniería, basándose en los avances de la teoría y la práctica del control automático. [24]

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4.1. Identificación de requerimientos

4.1.1. Requerimientos generales:

Los requerimientos generales se basan en las cualidades que debe presentar el sistema:

- El sistema debe de ser de bajo costo, y con materiales accesibles dentro del entorno de la Universidad Continental.
- El módulo debe tener características de fácil implementación, centrándome en el diseño de control.
- El módulo debe tener la característica de portabilidad.

4.1.2. Requerimientos mecánicos:

Los requerimientos mecánicos del sistema que se debe cumplir son los siguientes:

- El sistema no debe tener una dimensión mayor a 1m x 1m x 1m
- El sistema debe contar con un HMI (*Interfaz Hombre – Máquina*) en la misma estructura.
- El módulo debe tener un diseño simple que permita entender la dinámica del sistema.
- El módulo debe presentar un peso medio – bajo.

4.1.3. Requerimientos eléctricos y electrónicos:

Los requerimientos eléctricos y electrónicos del sistema que se debe cumplir son los siguientes:

- El sistema debe recibir una única entrada de alimentación de 12V.
- El sistema debe tener un regulador de 5V para la alimentación del controlador y los sensores.
- El circuito electrónico debe ser de poca complejidad.
- El circuito electrónico debe contemplar todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de todos los componentes.

4.1.4. Requerimientos de los elementos del sistema

El sistema de levitación tubo – esfera, se caracteriza por ser un sistema no lineal inestable, para ellos se deben cumplir 3 requisitos:

- Para el ventilador centrífugo se debe tener en cuenta, no obstruir el área de abducción de aire, en caso de un ventilador de flujo de aire o de presión estática, el acceso de aire debe ser de igual o mayor área que el área del ventilador.
- Para el sensor se debe tener en cuenta su naturaleza, en caso de ser un sensor SHARP, las condiciones de trabajo no deben de ser: bajo la influencia de radiación no ionizante, más específicamente rayos infrarrojos y radiación ultravioleta, de preferencia trabajar en condiciones de vacío. En el caso de un sensor ultrasónico, este debe de trabajar con la presencia de un fluido estático, con velocidad constante o de lo contrario en un espacio cerrado.
- El sistema debe tener un efector con geometría esférica ya que el análisis y el comportamiento aerodinámico cambiarán en función a éste.

4.2. Análisis de la solución

Para obtener la solución óptima, el análisis que se presenta a continuación, se basa en los “Métodos de diseño en Ingeniería Mecatrónica” del departamento de ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por: Benjamín Barriga Gamarra. [25]

4.2.1. Estructura de funciones

Se realizará un análisis basado en las funciones para poder determinar la solución óptima. Partiremos de las entradas y salidas del sistema, e iremos desglosando el funcionamiento del sistema.

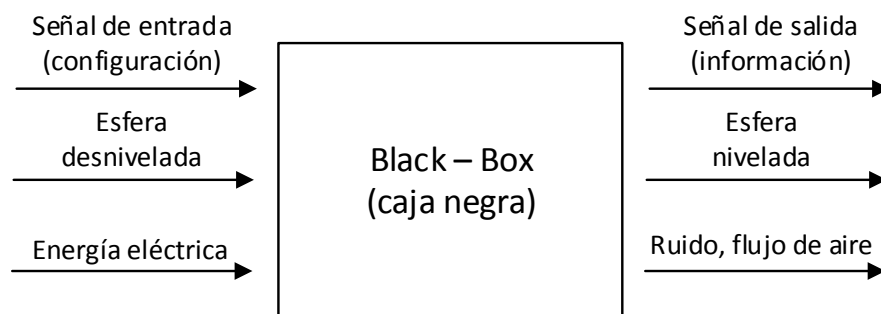


Figura 33. Caja Negra del sistema de levitación

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta la secuencia de operaciones, donde podemos identificar 4 secuencias de trabajo:

a. Preparación:

- Proporcionar energía al controlador.
- Proporcionar de energía al sensor.
- Proporcionar energía al actuador.
- Determinar las condiciones de inicio del sistema.
- Leer la configuración inicial introducida por el usuario.

b. Ejecución:

- General un flujo de aire dentro del tubo.
- Elevar la esfera.
- Sensar el nivel de la esfera.

c. Control:

- Verificar si el nivel de la esfera es el nivel deseado.
- Regular la potencia del actuador.
- Verificar los cambios de nivel de la esfera.

d. Fase final:

- Esperar a que se cumpla el periodo de estabilización de la esfera.
- Mostrar la información del nivel deseado y del nivel de la esfera
- Reiniciar la secuencia.

La distribución de los procesos depende mayormente del punto de vista del diseñador y dependiendo de este, se pueden generar distintas opciones de solución. A continuación, se presenta una distribución en 3 procesos.

a. Procesos manuales:

- Introducir los parámetros de control.
- Obtener el nivel actual de la esfera y el valor del nivel deseado.

b. Procesos mecánicos:

- Amplificación de la señal de control.
- Generación del flujo de aire.
- Elevación o descenso de la esfera al interior del tubo.

c. Procesos automáticos:

- Determinar de la señal de control.
- Determinar la posición actual de la esfera.
- Determinar la respuesta óptima del sistema.

De la secuencia de trabajo, podemos obtener el proceso interno del sistema que se muestra a continuación:

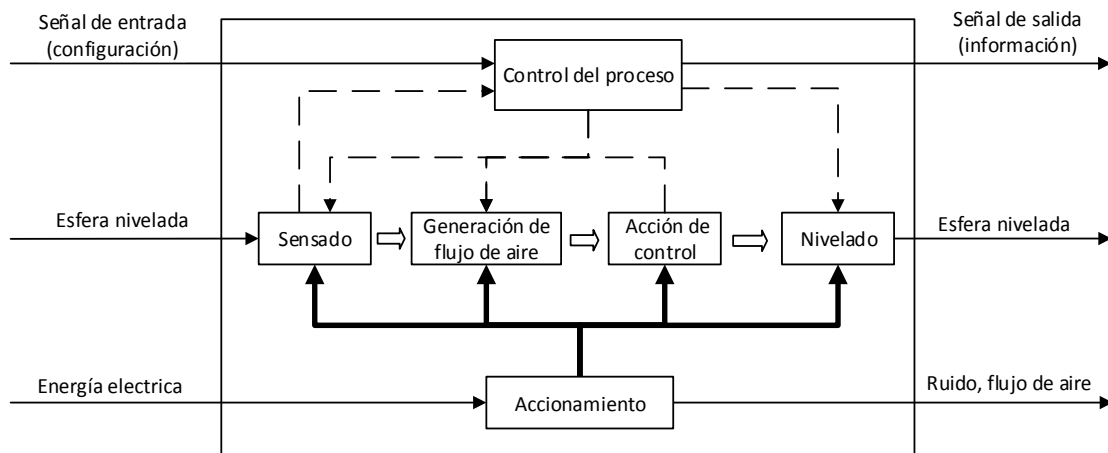


Figura 34. Sistema tubo – esfera para control de nivel

Fuente: Elaboración propia.

Del proceso general del sistema se logró obtener ocho funciones, los cuales se identificaron gracias a el proceso que debe cumplir el sistema y a la naturaleza del sistema tubo – esfera. Las funciones y como se relacionan entre sí, se muestra a continuación, en la secuencia de bloques:

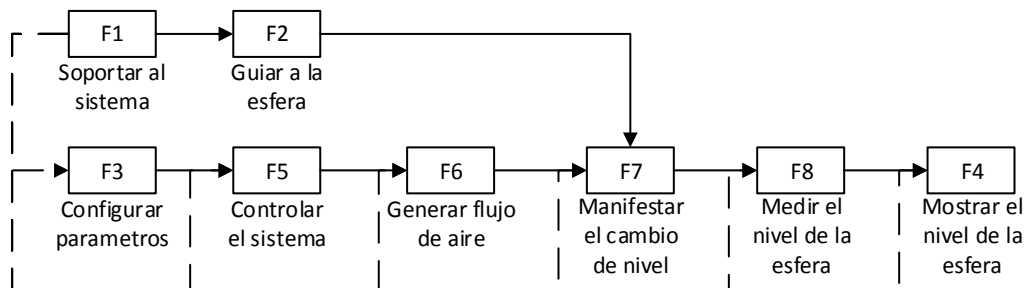


Figura 35. Diagrama de funciones

Fuente: Elaboración propia

Con las funciones identificadas se procedió a desarrollar la Matriz Morfológica de Zwicky, Fritz es así que se opta por la solución N°2 (Ver anexo A).

4.2.2. Diseño conceptual

La planta estará constituida por un ventilador que generará flujo de aire al interior de un tubo, esto generará que una esfera de baja densidad (*esfera de tecnopor*) se eleve, dicha elevación (*dada en centímetros*) será obtenida gracias a un sensor ultrasonido.

El sensor se posicionará en la parte superior, con la finalidad de que no obstruya el paso del aire a través del tubo. Debido a que el sensor se encontrará en la parte superior del sistema se debe realizar una operación a la medida proporcionada por el sensor, para poder obtener el valor de la altura de la esfera.

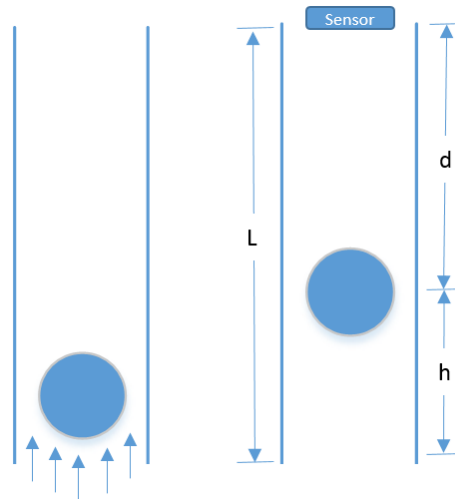


Figura 36. Diseño conceptual del sistema de levitación neumática

Fuente: Elaboración propia.

La altura de la esfera se obtendrá a partir de la lectura del sensor ultrasónico (d), mediante la ecuación: $h = L - d$, donde L es la altura del tubo.

El módulo de control debe tener un diseño que se respete y aproveche las características de percepción y destreza de una persona (*operario*).

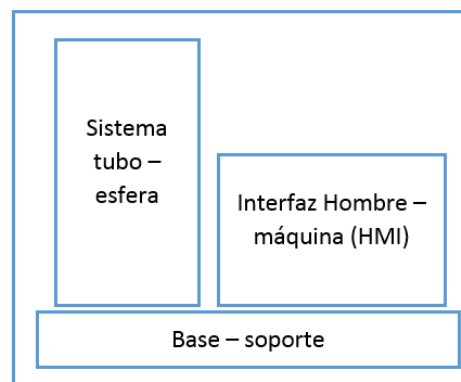


Figura 37. Diseño conceptual de la estructura del sistema de levitación neumática

Fuente: Elaboración propia.

El HMI (*Interfaz Hombre – Máquina*) se encontrará a la derecha debió a que la respuesta natural del cuerpo a buscar un objeto se da por la mano predominante y gran porcentaje de la población es diestra. Además, un requerimiento es que el

HMI se encuentre en la misma estructura que el sistema, por eso que se opta por unirlos mediante una base en común.

a. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo general está compuesto de subprocesos (ver *anexo B*) que cumplen tareas más específicas. A continuación, se muestra en la *figura 38*, el diagrama de flujo principal que contiene los siguientes sub-procesos:

- Encender el sistema.
- Leer entradas del HMI.
- Ejecutar la lógica de control.

Se debe mencionar que dentro de estos sub-procesos existen procesos aún más específicos que se relacionan entre sí.

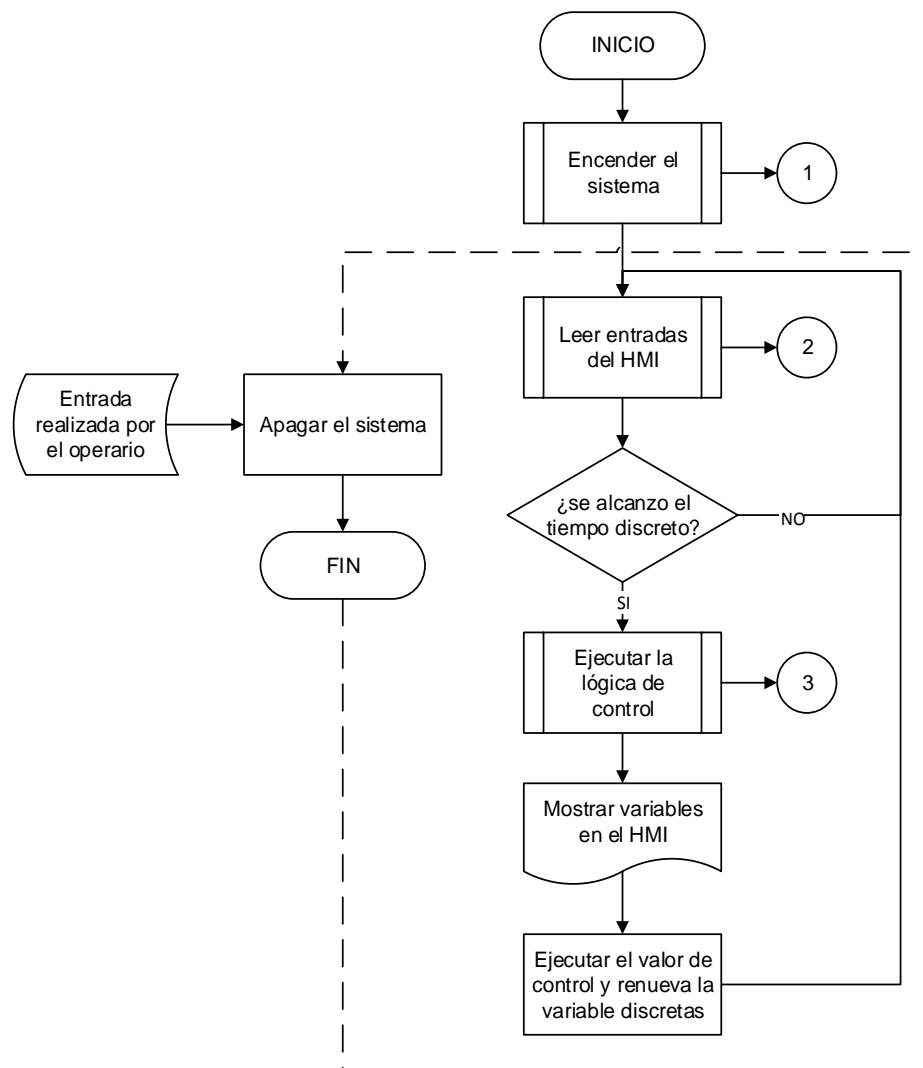


Figura 38. Diagrama de flujo principal

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Análisis de componentes

Los componentes y como se conectan entre sí, se muestra a continuación:

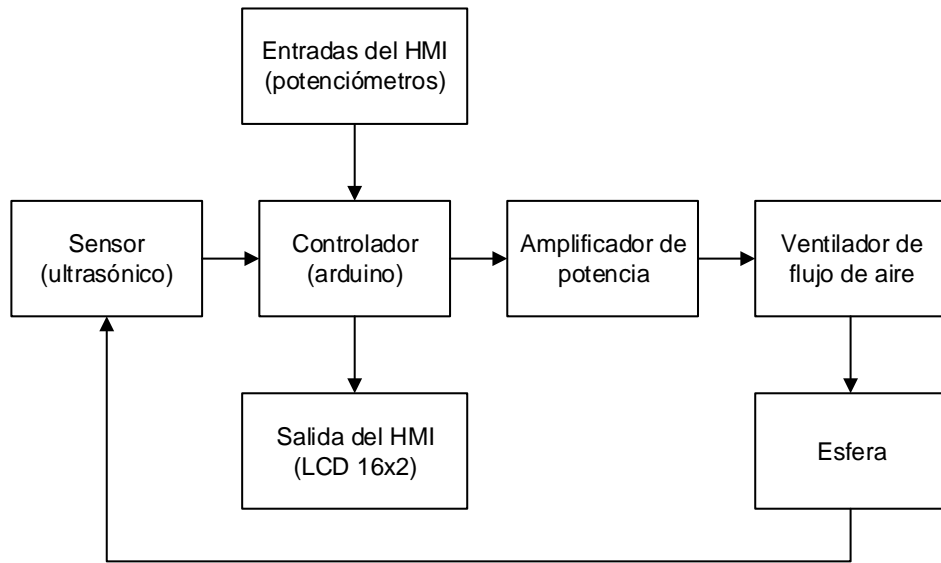


Figura 39. Diagrama de componentes

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Análisis de la tecnológica seleccionada

a. Arduino:

Dentro de las opciones en placas de Arduino con las que se cuenta, son las versiones: UNO, NANO, MEGA y DUE. Analizando las características que se presentan en el marco teórico sobre las placas de Arduino se realizó una evaluación (ver anexo C). Es así que se opta por el uso de un Arduino NANO.

De la figura 39. Se tiene como elementos de entrada el sensor y las entradas del HMI y como elementos de salida el display LCD y el amplificador de potencia.

Pins de Arduino	Sensor Ultrasónico
Salida de 5V DC	Vcc
Pin 10	Echo
Pin 11	Trigger
Terminales GND unificados.	

Tabla 12. Tabla de conexiones Arduino – Sensor

Fuente: Elaboración propia.

Pins de Arduino	Entradas del HMI
Pin A0	Entrada del valor de referencia
Pin A1	Entrada del periodo de estabilización
Pin A2	Entrada del valor de Kp
Pin A3	Entrada del valor de Ki
Pin A4	Entrada del valor de Kd
Terminales GND unificados.	

Tabla 13. Tabla de conexiones Arduino – Entradas HMI

Fuente: Elaboración propia.

Pins de Arduino	Salida del HMI (LCD 16x2)
GND	Vss
Salida de 5V DC	Vdd
Pin 15	RS
GND	R/W
Pin 14	E
Pin 8	D4
Pin 7	D5
Pin 6	D6
Pin 5	D7
Terminales Vss y RS conectadas a un terminal GND	

Tabla 14. Tabla de conexiones Arduino – Salidas HMI

Fuente: Elaboración propia.

Pins de Arduino	Amplificador de señal
Pin 13	Entrada PWM
Terminales GND unificados.	

Tabla 15. Tabla de conexiones Arduino – Amplificador de señal

Fuente: Elaboración propia.

La alimentación de Arduino NANO será por el pin Vin con un voltaje de 6V que se obtendrá de un regulador 7806.

b. Amplificador de señal:

La señal de control que proporciona el Arduino no es suficiente para poder accionar el ventilador de manera directa, es por ello que se requiere de una etapa de amplificación de señal. Un requerimiento electrónico es que el circuito debe ser de poca complejidad es así que se opta por una configuración basada en un transistor, específicamente un Mosfet IRFZ44N. Este componente posee tres modos de operación: corte, saturación y región óhmica, donde los dos primeros son los modos que nos interesa para el amplificador.

Para el IRFZ44N el voltaje de operación V_t es de 4V, para que el Mosfet este en corte se debe cumplir que el voltaje entre la compuerta y el surtidor sea menor que el voltaje de operación $V_{GS} < V_t$.

Para que el Mosfet se encuentre en saturación se debe cumplir que: el voltaje entre drenador y surtidor sea mayor a la diferencia entre el voltaje de la compuerta y el surtidor con el voltaje de operación $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$ y a la vez el voltaje entre la compuerta y el surtidor sea mayor que el voltaje de operación $V_{GS} > V_t$.

Se debe mencionar que el uso del optoacoplador es para separar la etapa de potencia con la etapa de señal, el fototransistor del optoacoplador debe presentar un $V_{ce} < 8V$ para que el Mosfet este en corte y debe presentar $V_{ce} > 8V$ para que el Mosfet entre en saturación.

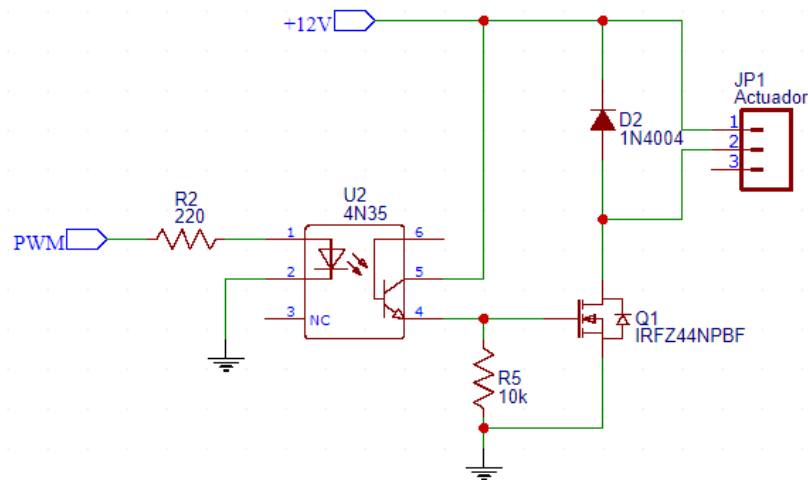


Figura 40. Amplificador de señal de control

Fuente: Elaboración propia.

c. Sensor:

El sensor seleccionado es el sensor ultrasónico HC-SR04. Las características específicas del sensor se muestran a continuación:

Voltaje de trabajo	DC 5V
Corriente de trabajo	15 mA
Frecuencia de trabajo	40 Hz
Máximo rango	4 m
Mínimo rango	2 cm
Angulo de apertura	15 grados sexagesimales
Señal de entrada de disparo	10uS
Señal de salida de eco	Proporcional a la distancia
Dimensiones	45x20x15 mm

Tabla 16. Tabla de características del sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: ElecFreaks.

La salida de eco, proporcionada por el sensor, es una señal de tiempo en microsegundos proporcional a la distancia del objeto, esta señal para ser transformada a centímetros se utiliza la fórmula: $d = \frac{us}{58}$ en caso de que se desee la distancia en pulgadas, la fórmula será: $d = \frac{us}{148}$. Para la implementación de la lógica de control se hará uso de la distancia en cm, por lo que se usará la primera fórmula.

d. Ventilador de flujo de aire:

El ventilador seleccionado es un ventilador Innovative DC brushless fan motor BS601512H.

Voltaje de trabajo	12 V
Corriente de trabajo	180 mA
Dimensiones	60x60x15 mm
Función de transformación de energía	$f(h, V)$ lineal Para un ventilador de 12V

Tabla 17. Características del ventilador Innovative dc brushless

Fuente: electromyne.

e. Esfera:

La esfera de tecnopor presenta las siguientes características:

Diámetro	5.119 cm
Masa	4 g
Coeficiente de arrastre	0.47 (valor para una esfera)
Área de referencia (proyección)	20.58 cm ²
Densidad de la esfera	0.057 g/cm ³

Tabla 18. Tabla de características de la esfera de tecnopor

Fuente: Elaboración propia

f. Entradas de HMI:

Las entradas del HMI serán potenciómetros que permitirán ingresar las constantes de control. Siendo cinco parámetros: constantes de control proporcional, integral, derivativo, referencia de nivel y control óptimo por tiempo de estabilización.



Figura 41. Disposición de elementos de entrada del HMI
Fuente: Elaboración propia.

g. Salida de HMI:

La salida del HMI consta de un display LCD 16x2 que mostrará el valor de referencia y el nivel medido de la esfera.

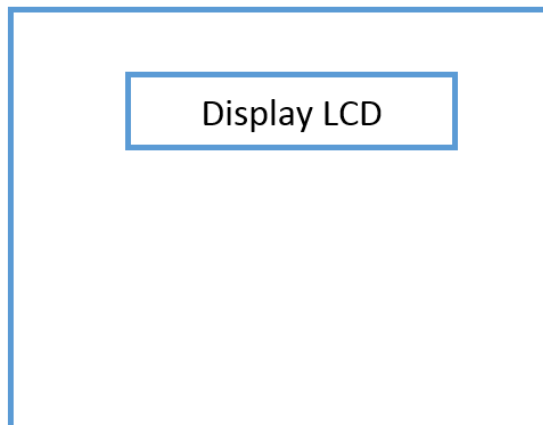


Figura 42. Disposición de elemento de salida del HMI
Fuente: Elaboración Propia.

Se debe mencionar que las conexiones del display están en la sección de conexiones del Arduino (ver tabla 14). Aunque determinadas conexiones no son directamente al controlador por lo que se muestra el esquema general en la figura 43.

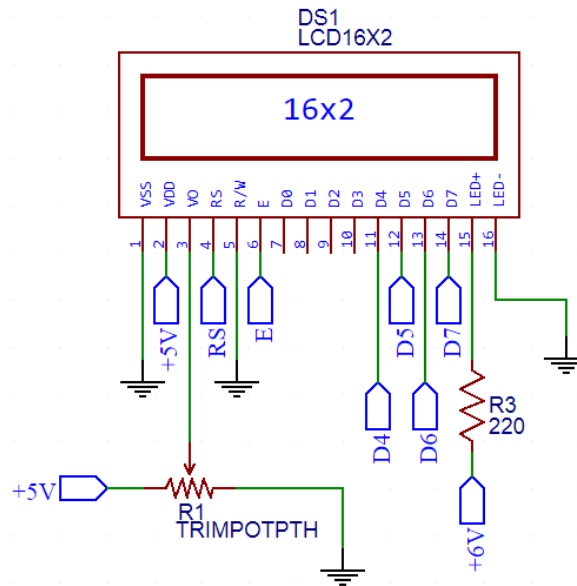


Figura 43. Display LCD 16x2
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Diseño

El módulo presenta un diseño que permite facilitar su réplica apoyándose en la tecnología del FabLab de la Universidad Continental, siendo su estructura de MDF de 3mm de espesor.

4.3.1. Diseño de la estructura del prototipo

Las dimensiones del módulo son: 400x250x760mm.

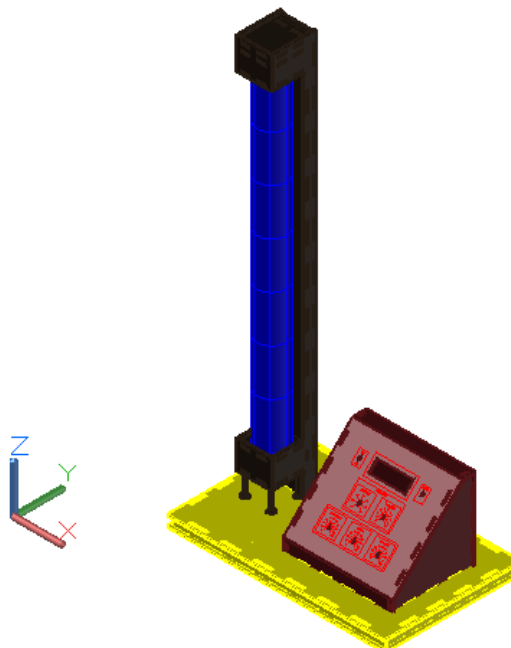


Figura 44. Vista general del módulo de levitación neumática
Fuente: Elaboración propia.

El módulo contempla tres partes:

- **Base – soporte:** La base permite unificar las partes además de brindar un soporte para los elementos internos del HMI y un punto de apoyo para el sistema tubo – esfera.
- **Interfaz hombre – máquina:** Contempla las cinco entradas y una salida de HMI.
- **El sistema tubo – esfera:** Presenta un tubo con recorrido de 600 mm para la esfera y un diámetro de 54 mm dado que la esfera tiene un diámetro de 51.19 mm, se puede asegurar que la esfera no tendrá problemas para recorrer de extremo a extremo al tubo.

a. Base – soporte:

Las dimensiones de la base son: 400x250x21mm.

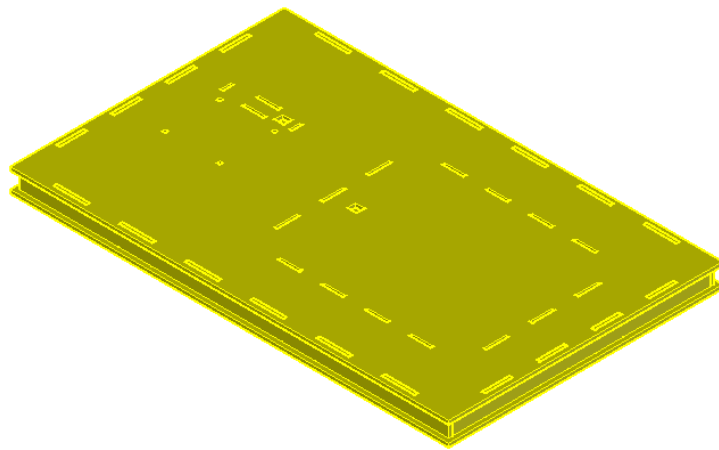


Figura 45. Vista de la base-soporte del módulo de levitación neumática

Fuente: Elaboración propia.

La base del módulo presenta ranuras para encajar las piezas, además presenta espacio y ranuras para el paso de los cables de conexión del sistema tubo – esfera hacia el HMI.

b. Interfaz hombre – máquina:

Las dimensiones del HMI son: 200x153x150mm.

El HMI contempla las cinco entradas de configuración para los parámetros de control, además de un espacio para el elemento de salida (display LCD). Además de dos ranuras para el interruptor de encendido y apagado al lado izquierdo del display y un pulsador de reset al lado derecho.

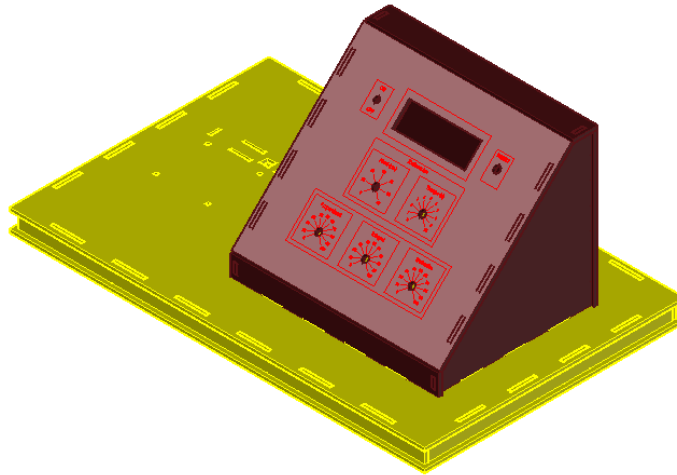


Figura 46. Vista del HMI del módulo de levitación neumática
Fuente: Elaboración propia.

Alrededor de las ranuras para todos los elementos mencionados, se adicionó textos y cuadros que serán grabados sobre el MDF. El tablero de entradas y salidas presenta una inclinación de 45° para facilitar la visualización de los componentes.

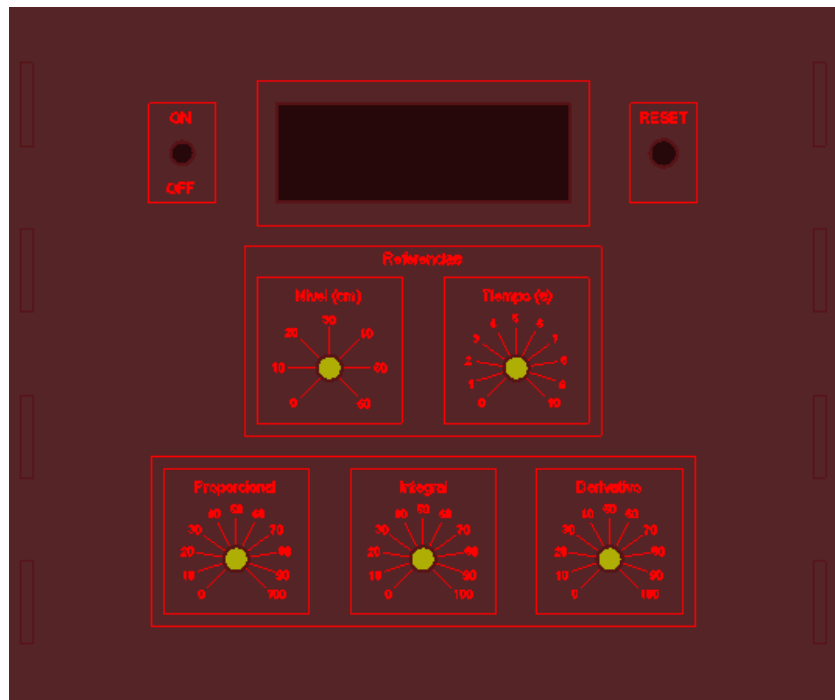


Figura 47. Vista de los grabados en el HMI
Fuente: Elaboración propia.

En la parte posterior del HMI se encuentran 2 ranuras adicionales las cuales corresponden a la clavija para la alimentación y para el portafusibles.

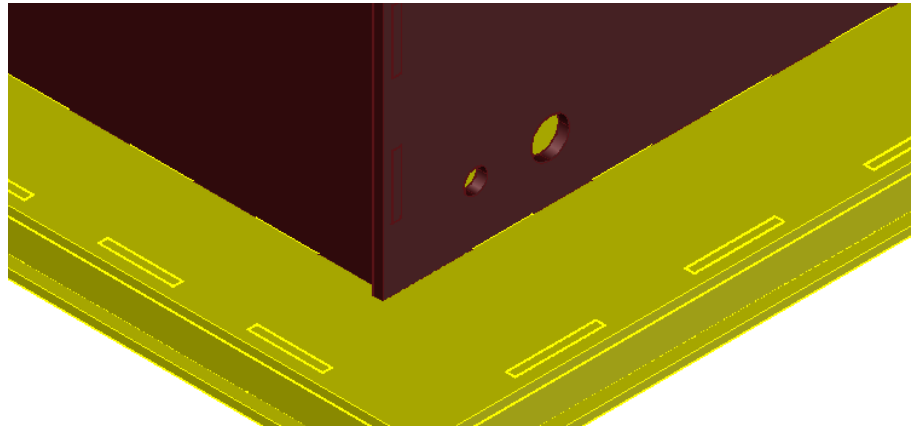


Figura 48. Vista posterior del HMI

Fuente: Elaboración propia.

c. Sistema tubo – esfera:

Las dimensiones del sistema tubo – esfera son: 66x82x739 mm.

En la parte inferior se presenta un espacio para el ventilador que a su vez guiará el aire hacia el tubo. El área de acceso de aire es de: 8127mm³ y el área de abducción del ventilador es: 2827mm³, cumpliendo así el requerimiento del actuador del sistema.

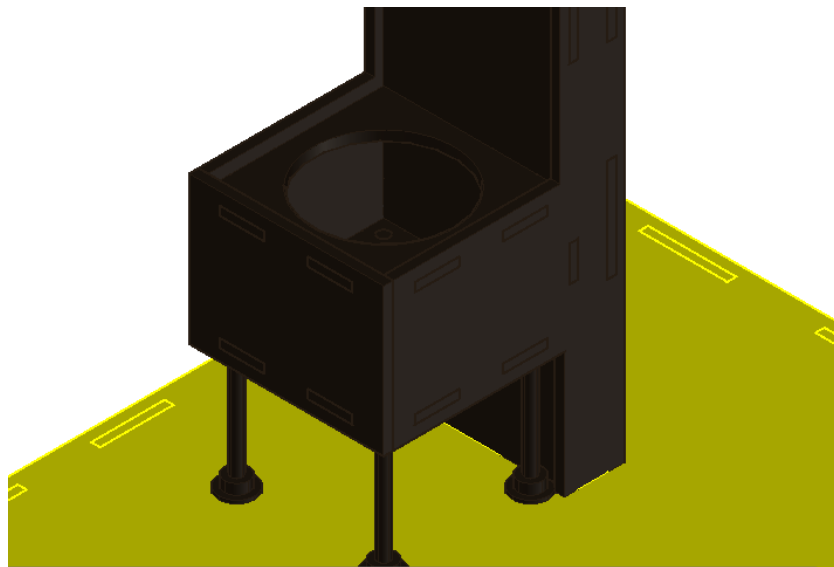


Figura 49. Vista de la parte inferior del sistema tubo – esfera

Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior se presenta una estructura que soporta al sensor. Este también cumple la función de soporte para el tubo, posicionándolo directamente debajo del sensor ultrasónico.

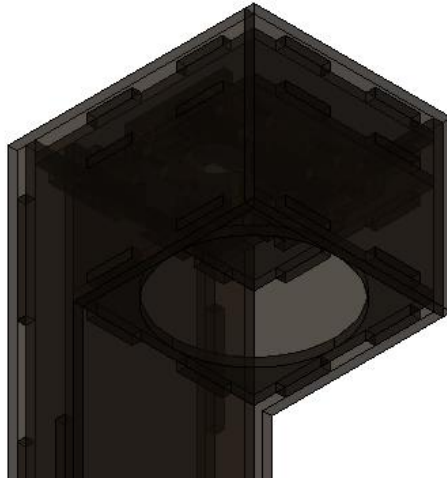


Figura 50. Vista de la parte superior del sistema tubo – esfera

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la parte superior del sistema existe una estructura que sirve para impedir el desplazamiento del sensor ultrasónico. De este modo se asegura que el sensor este siempre orientado hacia el interior del tubo, siendo la esfera el único objeto que detectará.

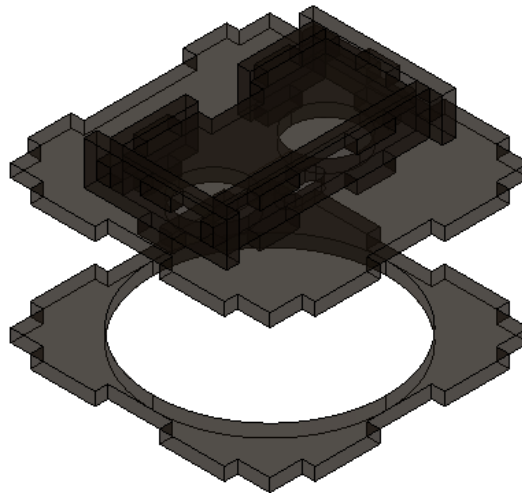


Figura 51. Vista de la estructura de soporte del sensor

Fuente: Elaboración propia.

Los planos de los elementos están en 2D debido a que el prototipo obtuvo gracias al cortador láser del FabLab de la Universidad Continental.

4.3.2. Diseño electrónico

Los componentes electrónicos se dispondrán en una placa, la cual debe contemplar todos los componentes que permitan el correcto funcionamiento de los dispositivos usados. El área de la placa es de: 102.87x55.88 mm.

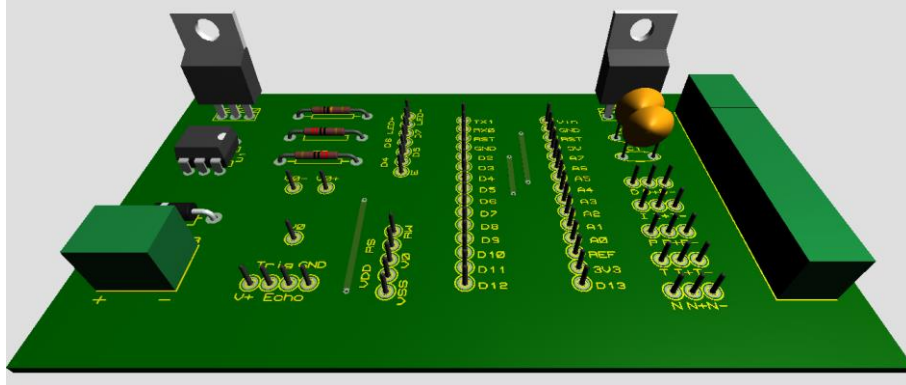


Figura 52. Vista de la placa electrónica

Fuente: Elaboración propia.

Se puede dividir a la placa en tres partes, visto de izquierda a derecha, componentes electrónicos para los elementos de salida, Arduino y componentes electrónicos para los elementos de entrada.

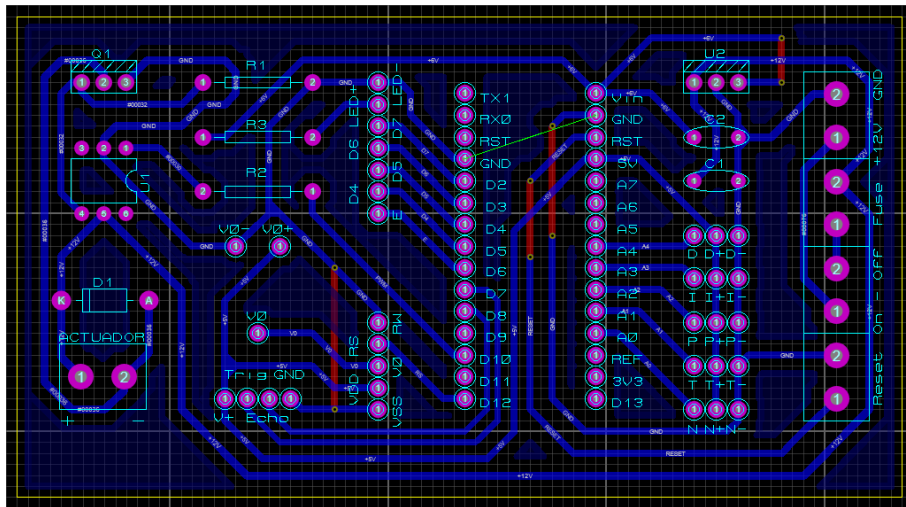


Figura 53. Vista de los componentes y pistas de la placa electrónica

Fuente: Elaboración propia.

Los componentes electrónicos se detallan en las siguientes tablas:

Componentes	Dispositivo electrónico
C1	Capacitor de 0.33uF
C2	Capacitor de 0.1uF
D1	Diodo 1N4004
Q1	Mosfet IRFZ44N
R1	Resistencia de 10kΩ

R2	Resistencia de 220Ω
R3	Resistencia de 220Ω
U1	Optoacoplador 4N35
U2	Regulador 7806
Terminales V0-,V0 y V0+	Trimpot de 10kΩ

Figura 54. Tabla de componentes electrónicos

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Diseño del sistema de control

a. Modelo en espacio de estados del sistema:

El análisis del sistema parte desde la identificación del espacio de estados, donde:

$$f_d = \text{peso}$$

$$f_{a(t)} = \text{fuerza de arrastre del aire}$$

$$f_{r(t)} = \text{fuerza resultante}$$

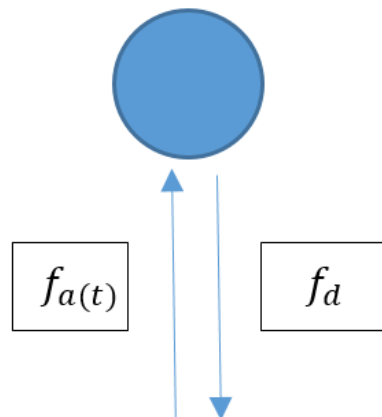


Figura 55. Fuerzas que actúan sobre la esfera

Fuente: Elaboración propia.

Siendo:

m : masa de la esfera

ρ_e : densidad de la esfera

ρ_a : densidad del fluido

D : diametro de la esfera

A : area de referencia del objeto (area proyectada)

C_d : coeficiente de arrastre

L : longitud del recorrido de la esfera

v : velocidad del objeto relativa al fluido

v_a : velocidad del aire

v_e : velocidad de la esfera

h : nivel de la esfera

δ : volumen de la esfera

r : radio de la esfera

V : voltaje

c : constante de acción del ventilador

Para poder determinar los espacios de estado debemos determinar las variaciones de los estados que serían: la velocidad de la esfera, la velocidad del aire y el nivel de la esfera.

Aplicando la segunda ley de Newton:

$$f_{a(t)} - f_d = f_{r(t)}$$

Reemplazando la ecuación (3):

$$\frac{1}{2}\rho_a v^2 C_d A - mg = ma$$

$$\frac{1}{2}\rho_a (v_a - v_e)^2 C_d A - mg = ma \quad (9)$$

Además:

$$\delta = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (10)$$

$$A = \pi r^2 \quad (11)$$

$$\rho_e = \frac{m}{\delta} \quad (12)$$

Reemplazando (11) en (10):

$$\delta = \frac{4}{3}Ar \quad (13)$$

Reemplazando (13) en (12):

$$\rho_e = \frac{3m}{4Ar}$$

$$A = \frac{3m}{4\rho_e r} \quad (14)$$

Reemplazando (14) en (9):

$$\frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_a m C_d (v_a - v_e)^2}{\rho_e r} - mg = ma \quad (15)$$

Simplificando el valor de "m" se puede obtener la aceleración de la esfera que se expresa como la derivada de la velocidad de la esfera.

$$\frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_a C_d (v_a - v_e)^2}{\rho_e r} - g = \frac{dv_e}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{dv_e}{dt} = \frac{\rho_a C_d}{\rho_e r} (v_a - v_e)^2 - g \quad (17)$$

Para la velocidad del aire partimos de su derivada:

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{f(V) - v_a}{2}$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{f(V)}{\Delta t} - \frac{v_a}{\Delta t}$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{cV}{\Delta t} - \frac{v_a}{\Delta t} \quad (18)$$

Para la altura su razón de cambio se expresa como el promedio de cambio:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{2}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{L - h}{2}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{L}{2} - \frac{h}{2} \quad (19)$$

Siendo las variables de estado:

$$x_1 = v_e$$

$$x_2 = v_a$$

$$x_3 = h$$

$$u_1 = V$$

Teniendo en cuenta que:

$$x_1 = \dot{x}_3$$

Se obtiene:

$$\dot{x}_1 = \frac{\rho_a C_d}{\rho_e r} \cdot (x_2 - x_1)^2 - g$$

$$\dot{x}_2 = \frac{c}{\Delta t} \cdot u_1 - \frac{1}{\Delta t} x_2$$

$$\dot{x}_3 = \frac{L}{2} - \frac{1}{2} x_3$$

Reemplazando:

$$l = \frac{\rho_a C_d}{\rho_e r}$$

$$n = -\frac{1}{\Delta t}$$

$$p = -\frac{1}{2}$$

$$q = \frac{c}{\Delta t}$$

Siendo el espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l & l & 0 \\ 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (20)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Desarrollando la ecuación de matrices (19) y (20):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -lx_1 + lx_2 \\ nx_2 + qu_1 \\ px_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$y = [x_1] \quad (23)$$

Entonces para x_1 :

$$\dot{x}_1 = -lx_1 + lx_2$$

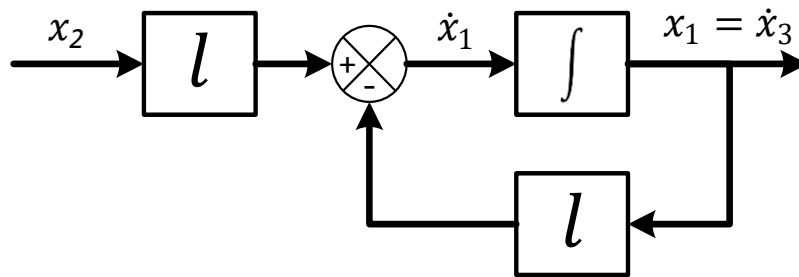


Figura 56. Diagrama de bloques del primer estado

Fuente: Elaboración propia.

Para x_2 :

$$\dot{x}_2 = nx_2 + qu_1$$

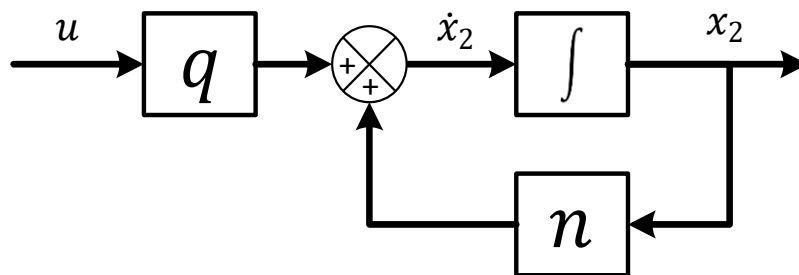


Figura 57. Diagrama de bloques del segundo estado

Fuente: Elaboración propia.

Para x_3 :

$$\dot{x}_3 = px_3$$

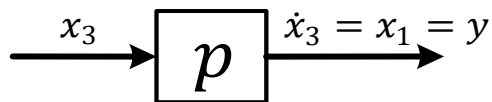


Figura 58. Diagrama de bloques del segundo estado

Fuente: Elaboración propia.

Uniendo los diagramas se obtiene el diagrama de bloques del sistema:

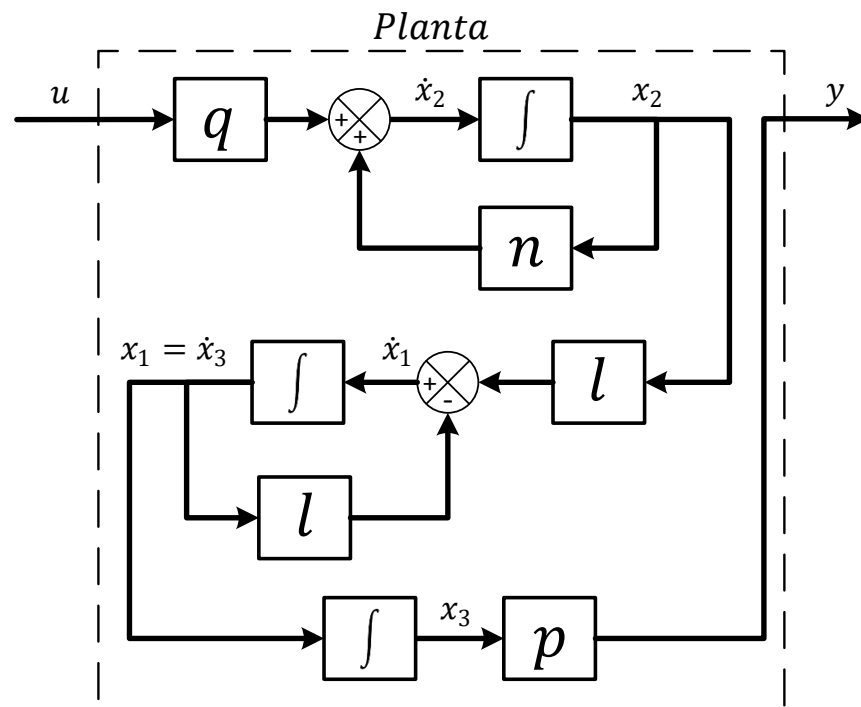


Figura 59. Diagrama de bloques de la planta

Fuente: Elaboración propia.

El espacio de estados muestra que la ecuación característica del sistema es de tercer grado (Ver matriz A). Para expresar las ecuaciones de estado en forma general se debe tener en cuenta:

$$A = \begin{bmatrix} -l & l & 0 \\ 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = 0$$

Se tiene que:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (24)$$

$$y = Cx + D \quad (25)$$

El sistema es realimentado (feedback) e incorpora un control PID. Siendo el diagrama de bloques:

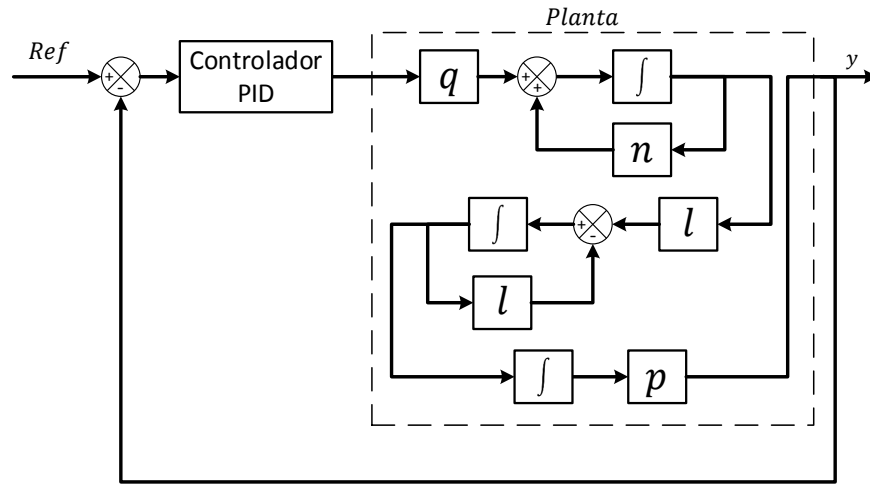


Figura 60. Diagrama de bloques de estado con feedback y control PID

Fuente: Elaboración propia.

La incorporación del controlador óptimo de tipo “feedforward” requiere del análisis del modelo a incorporar, siendo el modelo Skyhook compatible con el sistema tubo – esfera de levitación neumática.

b. Modelo óptimo en espacio de estados:

El sistema skyhook se muestra en la figura (61)

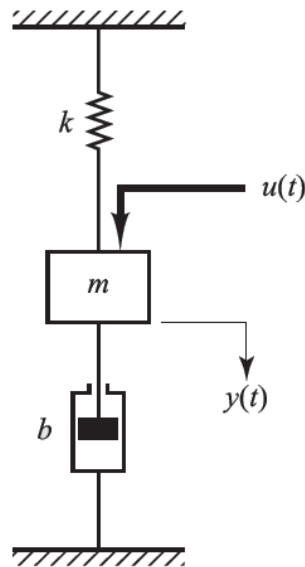


Figura 61. Sistema skyhook

Fuente: Ingeniería de control moderna. Por: Katsuhiko Ogata.

Con la segunda ley de Newton obtenemos que:

$$u_{(t)} - f_{resorte} - f_{amortiguador} = m \cdot a$$

$$u_{(t)} - ky_{(t)} - b\dot{y}_{(t)} = m\ddot{y}_{(t)}$$

$$\dot{y}(t) = -\frac{k}{m}y(t) - \frac{b}{m}\dot{y}(t) + \frac{1}{m}u(t) \quad (26)$$

Siendo las variables de estado:

$$x_4 = y(t)$$

$$x_5 = \dot{y}(t)$$

$$u_1 = u(t)$$

$$x_5 = \dot{x}_4$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{k}{m}x_4 - \frac{b}{m}x_5 + \frac{1}{m}u \quad (27)$$

$$x_4 = y_s \quad (28)$$

Siendo el espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u_1 \quad (29)$$

$$y_s = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (30)$$

De las ecuaciones (26) y (27):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_5 \\ -\frac{k}{m}x_4 - \frac{b}{m}x_5 + \frac{1}{m}u_1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$y_s = [x_4] \quad (32)$$

Para \dot{x}_4 :

$$\dot{x}_4 = x_5$$

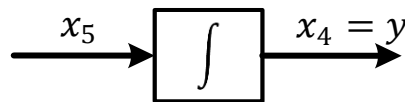


Figura 62. Diagrama de bloques del primer estado óptimo

Fuente: Elaboración propia.

Para \dot{x}_5 :

$$\dot{x}_5 = -\frac{k}{m}x_4 - \frac{b}{m}x_5 + \frac{1}{m}u_1$$

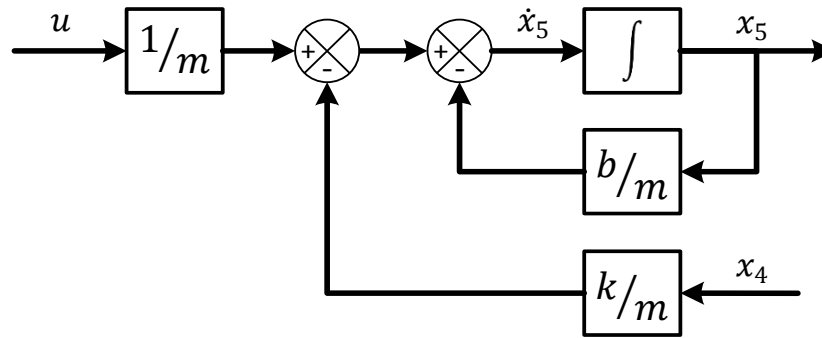


Figura 63. Diagrama de bloques del segundo estado óptimo

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama general del sistema óptimo es de la siguiente manera:

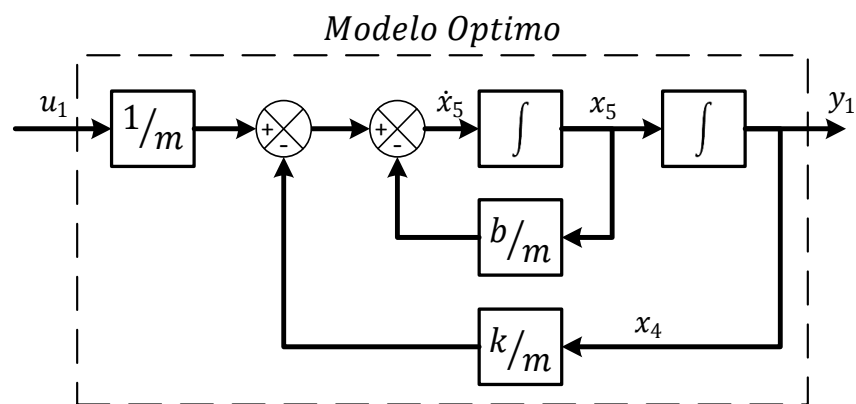


Figura 64. Diagrama de bloques de estado del sistema óptimo

Fuente: Elaboración propia.

Para la ecuación de estado del modelo óptimo expresado de manera general tenemos:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \quad 0]$$

$$D_1 = 0$$

Se tiene que:

$$\dot{x}_s = A_1 x + B_1 u_1 \quad (33)$$

$$y_s = C_1 x + D_1 \quad (34)$$

4.3.4. Análisis del modelo de control para su implementación

a. Control PID en el dominio del tiempo:

La ecuación (8) es la que se implementará en el controlador. Para poder entender mejor el proceso de implementación ver *anexo G*.

b. Control MPC en el dominio del tiempo:

Para determinar y analizar el comportamiento del modelo óptimo se requiere de la función de transferencia, para ello se puede utilizar la siguiente fórmula para las matrices de estado:

$$G_{(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (35)$$

En caso contrario se puede aplicar la transformada de Laplace en la ecuación (25), despejando $Y_{(s)}/R_{(s)}$. Aplicando cualquier método la función de transferencia en el dominio de Laplace se expresa:

$$G_{(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (36)$$

Se identifica que la función de transferencia del modelo es de segundo grado por lo tanto su forma estándar se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{Y_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{1}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (37)$$

Donde:

k : Ganancia

ζ : Factor de amortiguamiento

τ : Periodo natural

Para la implementación del modelo óptimo se debe identificar el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo. A continuación, se realiza el análisis de la ecuación característica para determinar el comportamiento en el dominio del tiempo.

Donde su función característica es:

$$\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1 \quad (38)$$

Siendo la solución por fórmula general:

$$S_1 = -\frac{\zeta}{\tau} + \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \quad y \quad S_2 = -\frac{\zeta}{\tau} - \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau}$$

Se puede expresar las soluciones de la siguiente manera:

$$\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1 = (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \quad (39)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} \tau^2 &= \tau_1 \tau_2 \\ \zeta &= \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\sqrt{\tau_1 \tau_2}} \end{aligned}$$

Igualando las soluciones:

$$S_1 = -\frac{1}{\tau_1} = -\frac{\zeta}{\tau} + \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \quad y \quad S_2 = -\frac{1}{\tau_2} = -\frac{\zeta}{\tau} - \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau}$$

Despejando los valores de τ_1 y τ_2 :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\tau}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}} \\ \tau_2 &= \frac{\tau}{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}} \end{aligned}$$

En general:

$$\tau_{12} = \frac{\tau}{\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}}$$

La respuesta del modelo óptimo en dominio del tiempo se expresa de la siguiente manera:

$$y(t) = \Delta R \left[1 + \frac{\tau_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \tau_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\tau_1 - \tau_2} \right] \quad (40)$$

Donde:

$t = tiempo$

$\Delta R = variacion de la referencia$

Siendo las entradas la variación de la referencia ΔR y el periodo natural τ , el cual generará un cambio en las soluciones τ_1 y τ_2 este cambio dependerá de la constante de amortiguamiento, por lo cual se debe determinar el valor idóneo de ζ .

Se debe tener en cuenta que el periodo natural tendrá un rango de acción de 0 a 1. El valor de la constante de amortiguamiento que permita la mejor respuesta será el valor que se usará en la implementación.

Para un valor de $\zeta = 0$, la constante de amortiguamiento no tendría acción por lo que la respuesta sería del tipo marginalmente estable. Cuyo comportamiento no es el deseado.

Para un valor de $0 < \zeta < 1$:

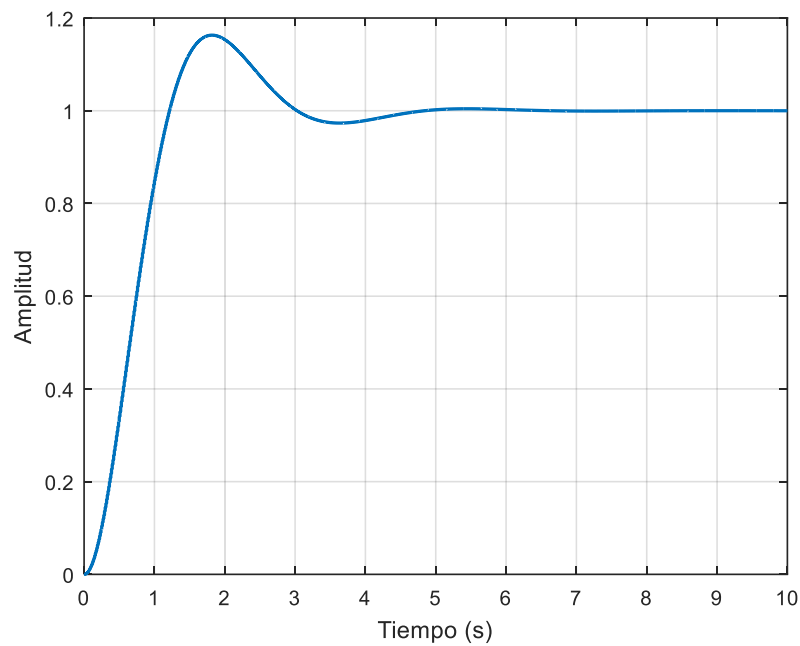


Figura 65. Respuesta del modelo óptimo con amortiguamiento $0 < \zeta < 1$

Fuente: Elaboración propia.

Con un valor de amortiguamiento menor a la unidad se aprecia un comportamiento subamortiguado, presentando un sobreimpulso, dado que los polos son conjugados.

Para un valor de $\zeta = 1$ se obtiene un valor de respuesta asintótico y sin solución dado que los polos son iguales, para el modelo en el dominio del tiempo dado que τ_1 y τ_2 iguales.

Para un valor de $\zeta > 1$:

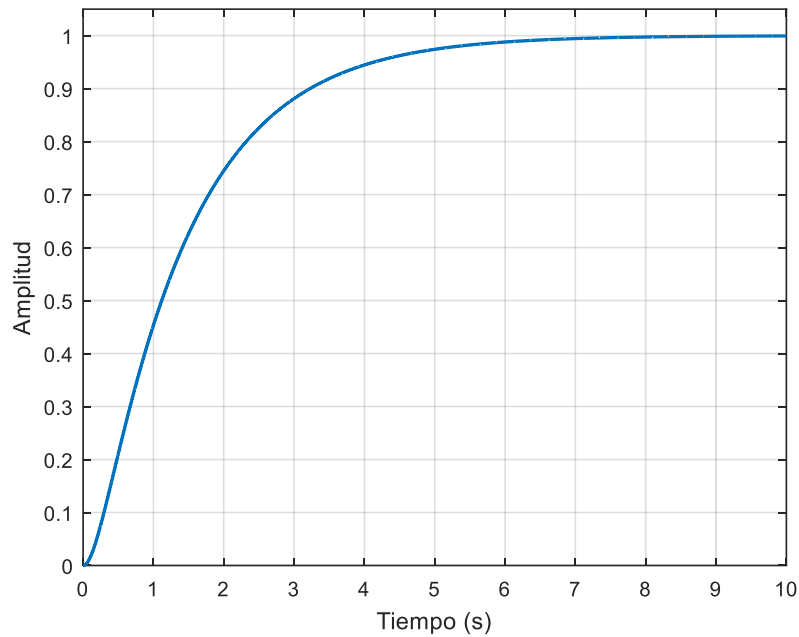


Figura 66. Respuesta del modelo óptimo para un valor de amortiguamiento mayor a la unidad

Fuente: Elaboración propia.

Con un valor de amortiguamiento mayor a la unidad se tiene una respuesta suave y sin sobreimpulsos siendo este el comportamiento idóneo.

Partiendo de la premisa anterior se buscó un valor para ζ que permitiera tener una respuesta lineal y proporcional al tiempo de asentamiento de 0 a 10 segundos con un 2% de margen para el error. El valor de 1.43 para la constante de amortiguamiento permite tener un rango de 0 a 10 segundos para el tiempo de asentamiento con comportamiento proporcional a τ en su rango de 0 a 1 (Ver anexo D). El periodo natural es el valor que se debe introducir al sistema al cual también identificaremos como la kff (*constante feedforward*).

c. Diseño del observador:

El observador seleccionado es conocido como EMA (Exponential Moving Average). Se expresa de la siguiente manera:

$$E_k = \alpha \sum_{k=0}^n \beta^k M_{n-k} \tag{41}$$

En un proceso de iteraciones continuas se expresa como una suma de valores consecutivos por ciclo, de la siguiente manera:

$$E_k = \alpha M_k + \beta E_{k-1} \quad (42)$$

Para una implementación de procesamiento en tiempo real se toma:

$$\alpha + \beta = 1$$

En un ciclo iterativo:

$$E_k = \alpha M_k + \beta E_{k-1} \quad (43)$$

$$E_k = \alpha M_k + (1 - \alpha)E_{k-1} \quad (44)$$

Donde:

E_k: Salida del observador

α: Factor de ponderación

M: valor medido

CAPÍTULO V CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

5.1. Presupuesto

Como la naturaleza de la investigación es teórica no se contempla un presupuesto para replicas funcionales. El presupuesto presentado corresponde al prototipo.

Estructura			
Materiales	Precio Unit. (S/.)	Cantidad	Total (S/.)
Esfera de tecnopor	0.5	1	0.5
Tornillo Stovebolt 5/32x3" x 10 unid.	3.4	1	3.4
Tornillo Stovebolt 5/32x3" x 10 unid.	3.4	1	3.4
Huacha a presión 5/32" x 10 unid.	0.3	2	0.6
Huacha plana 5/32" x 10 unid.	0.6	2	1.2
Tuerca hexagonal C 5/32"x 8 unid.	1.5	2	3
MDF 3mm	6	2	12
Mica transparente	0.5	2	1
Total			25.1

Tabla 19. Presupuesto para la estructura del sistema

Fuente: Elaboración propia.

Interfaz			
Materiales	Precio Unit. (S/.)	Cantidad	Total (S/.)
Potenciómetros (250k Ω)	1	5	5
Display LCD 16x2	13	1	13
Interruptor de palanca 2 estados	2	1	2
Pulsador	1.5	1	1.5
Total			21.5

Tabla 20. Presupuesto para la interfaz del sistema

Fuente: Elaboración propia.

Electrónica			
Materiales	Precio Unit. (S/.)	Cantidad	Total (S/.)
Arduino NANO V3	32	1	32
Fuente de alimentación	20	1	20
Baquelita	3	1	3
Trimpot (10K Ω)	1.5	1	1.5
Resistencias (220 Ω , 330 Ω , 10k Ω)	0.1	3	0.3
Espadines macho	1.5	2	3
Espadines hembra	1.5	2	3
Capacitores (0.1uF y 0.33uF)	0.3	2	0.6

Diodo 1N4004	0.8	1	0.8
Regulador 7805	1.5	1	1.5
Opto acoplador 4n35	1	1	1
Mosfet IRFZ44N	3.5	1	3.5
Bornera 2 terminales	1	5	5
Sensor HC-SR04	10	1	10
Ventilador DC brushless BS601512H	30	1	30
Cables jumper Macho - Macho	8	2	16
Cables jumper Macho - Hembra	8	2	16
Cables jumper Hembra - hembra	8	2	16
Total			162.4

Tabla 21. Presupuesto para la electrónica del sistema

Fuente: Elaboración propia.

FabLab	Precio por minuto (S/.)	Tiempo	Total (S/.)
Corte láser	1	22	22

Tabla 22. Presupuesto para el corte láser

Fuente: Elaboración propia.

Trabajo	Precio por hora (S/.)	Tiempo (hrs.)	Total (S/.)
Diseño de la PCB	15	4	60
Elaboración de la placa electrónica	15	2	30
Diseño del soporte	15	12	180
Ensamblaje del soporte	15	1	15
conexión de elementos	15	2	30
Total		21	315

Tabla 23. Presupuesto de mano de obra

Fuente: Elaboración propia.

De las tablas anteriores se puede obtener:

$$\text{Materia prima: } M_p = S/.231$$

$$\text{Mano de obra: } M_o = S/.315$$

Costo primo:

$$C_t = M_p + M_o$$

$$C_t = S/.546$$

Precio:

$$P = C_t + \%U * C_t$$

$$P = 546 + 10\% * 546$$

$$P = S/.600$$

5.2. Construcción

La construcción del prototipo para la validación del sistema de control parte de la obtención de las piezas, el proceso tomó 17 minutos en el cortador láser.

5.2.1. Construcción del prototipo

El ensamblaje de la estructura de MDF que cumple la función de soporte.



Figura 67. Prototipo de levitación neumática implementado.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que la estructura de MDF posee piezas que se encajan para facilitar su ensamblaje. Se colocaron 4 pernos y 4 tuercas además de tuercas gruesas para que no se pierda sujeción con el tiempo.

La placa electrónica se encuentra dentro del panel HMI, los elementos de entrada, salida, sensor y actuador se conectarán a la placa electrónica. Fue implementada en baquelita, con el método del planchado.

La placa electrónica presenta pines para la conexión de los elementos de entrada, salida y sensor, además de bornas para la alimentación, fusible, interruptor on – off, pulsador de reset y el actuador.

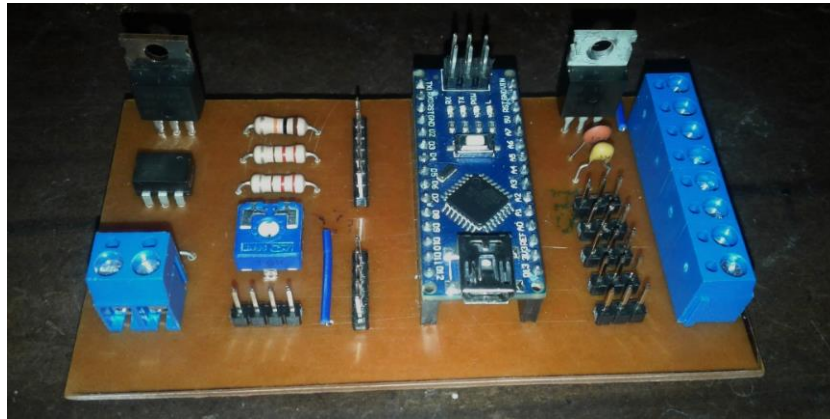


Figura 68. Placa electrónica ensamblada

Fuente: Elaboración propia.

El sensor ultrasónico se encuentra sujeto gracias a la estructura interna de la parte superior del soporte.



Figura 69. Sensor implementado

Fuente: Elaboración propia.

El módulo HMI contempla todos los elementos descritos en el diseño, el grabado de los potenciómetros se clasifican en 3, el de control PID que van de 0 a 100%, el de nivel que va de 0 a 60 cm y el de tiempo que va de 0 a 10 seg, todos con ángulo de barrido de 270°.

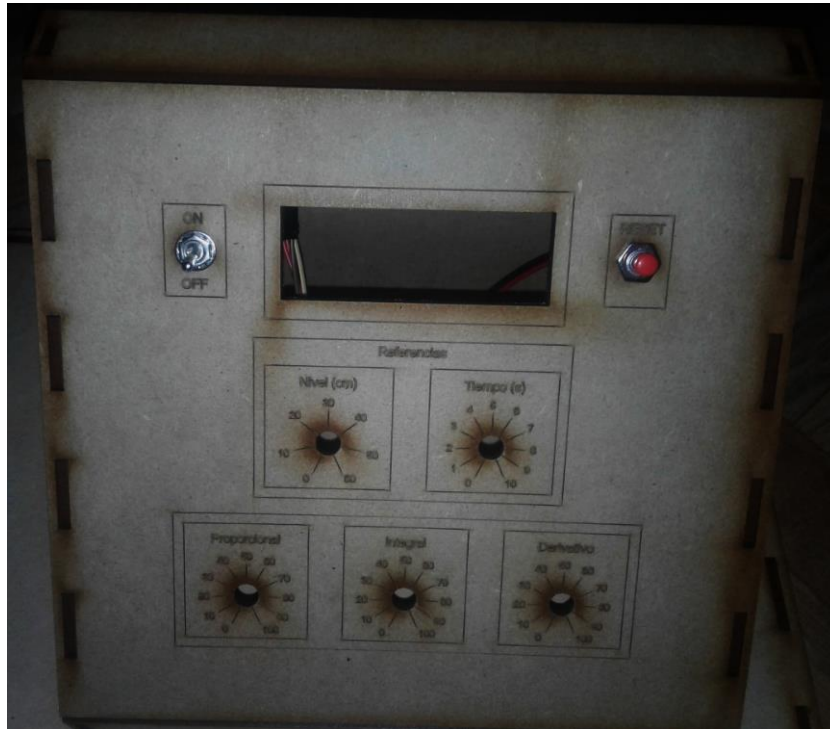


Figura 70. Panel HMI del sistema

Fuente: Elaboración propia.

El soporte del ventilador fue diseñado para el modelo de ventilador DC brushless fan motor BS601512H.



Figura 71. Ventilador incorporado en su soporte

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Proceso de análisis y validación

a. Análisis del tiempo discreto:

Como se aprecia en la figura 72 el tiempo discreto ronda entre los 20 ms por los aproximadamente los 100 primeros ciclos que sería un equivalente a los segundos, posterior a dicho tiempo el tiempo discreto ronda los 22 ms.

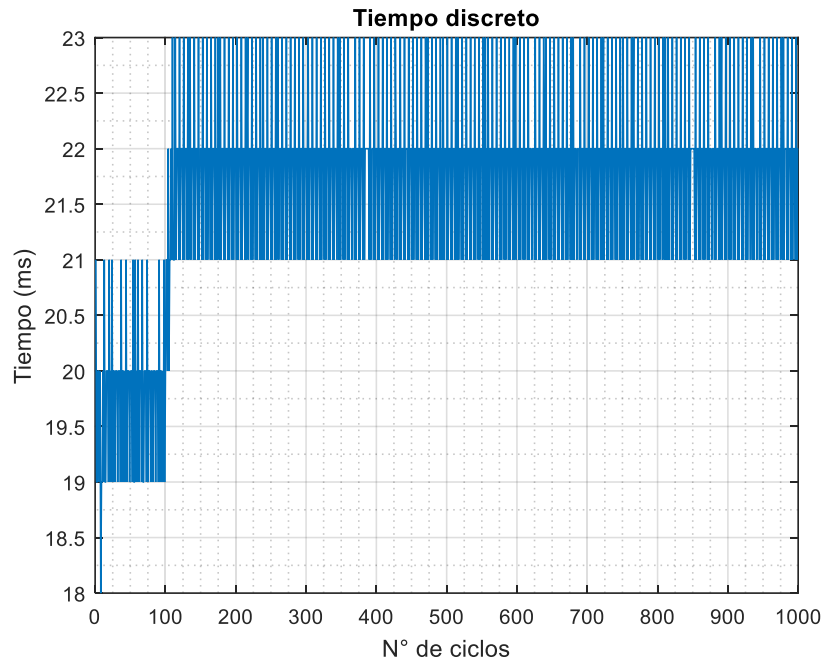


Figura 72. Número de ciclo Vs. Variación de Tiempo

Fuente: Elaboración propia.

La variación se da por un incremento en la carga de procesamiento, ocurrida en el segundo 2 aproximadamente. Esto es importante dado que ya se manifiesta un comportamiento atípico, por lo que se debe considerar preparar al sistema durante este periodo inicial de 2 segundos antes de que inicie el proceso de control del sistema.

b. Identificación del sistema:

Para el proceso de identificación del sistema se realiza un muestreo teniendo en cuenta la entrada y salida del sistema.

Debido a la naturaleza no estable del sistema se aplica un valor de entrada máximo por 200 ciclos. Cuando se cumplen los 200 ciclos se aplica una señal de aleatoria con frecuencia de cambio cada 3 ciclos, esto durante los 300 ciclos siguientes, para luego variar la frecuencia de cambio de la entrada a 10 ciclos por los últimos 500 ciclos.

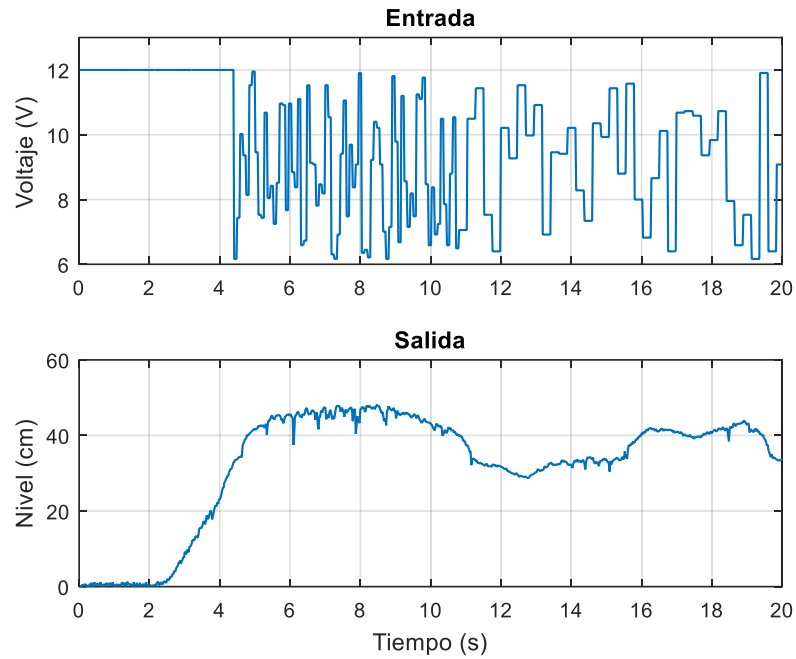


Figura 73. Gráficos de entrada y salida del sistema
Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de entrada y salida se puede identificar los espacios de estado y la función de transferencia. Para el proceso de identificación se usó el toolbox System Identification de Matlab (Ver anexo E)

Los espacios de estados identificados son los siguientes:

Matriz de estado calculado	Matriz de estado identificado
$A = \begin{bmatrix} -l & l & 0 \\ 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} 0.9977 & 0.02391 & -0.005914 \\ 0.007252 & 0.1407 & -0.8469 \\ 0.002981 & 0.6122 & 0.5149 \end{bmatrix}$
$B = \begin{bmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{bmatrix}$	$B = \begin{bmatrix} 1.129 \times 10^{-6} \\ 0.00122 \\ -0.0002788 \end{bmatrix}$
$C = [1 \quad 0 \quad 0]$	$C = [581.7 \quad -3.79 \quad 3.501]$
$D = 0$	$D = 0$

Tabla 24. Matrices de estados calculados e identificados
Fuente: Elaboración propia.

Todas las matrices tienen una relación directa con sus valores significativos exceptuando la matriz A donde existen valores significativos en A_{23} y A_{32} .

Matriz de estado calculado	Matriz de estado con valores significativos.
$A = \begin{bmatrix} -l & l & 0 \\ 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} 0.9977 & 0.02391 & 0 \\ 0 & 0.1407 & -0.8469 \\ 0 & 0.6122 & 0.5149 \end{bmatrix}$
$B = \begin{bmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{bmatrix}$	$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00122 \\ 0 \end{bmatrix}$
$C = [1 \quad 0 \quad 0]$	$C = [581.7 \quad 0 \quad 0]$
$D = 0$	$D = 0$

Tabla 25. Matrices de estados con valores significativos

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la importancia de A_{23} y A_{32} se procede a hacer un análisis del lugar geométrico de la raíces.

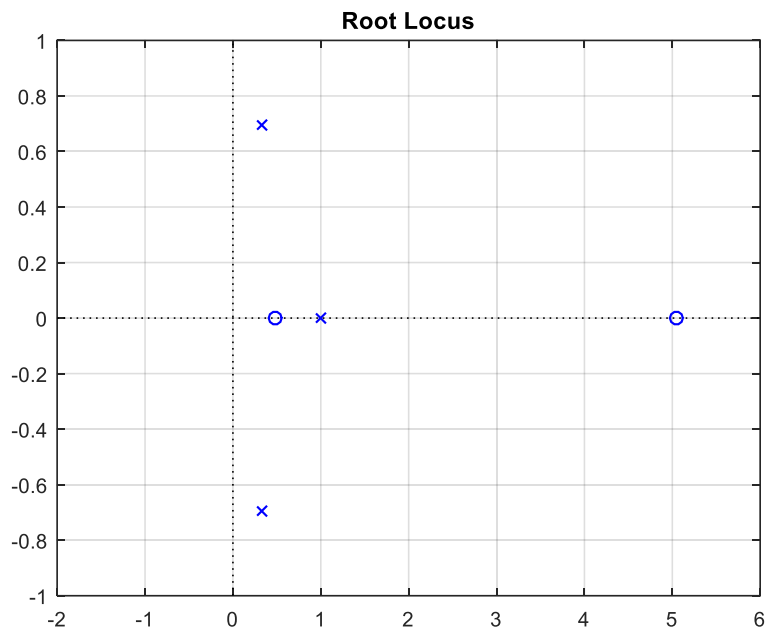


Figura 74. Polos y ceros del modelo identificado

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la *figura 74* los polos y ceros se encuentran en la zona positiva del eje de los reales lo que corrobora su característica de inestabilidad.

Siendo su función de transferencia:

$$G_{(s)} = \frac{1.228s + 1.326}{s^3 + 1.346s^2 + 0.7642s + 0.3281} \quad (45)$$

A continuación, se hace el análisis de polos considerando A_{23} y A_{32} igual a cero, para poder determinar su influencia y si en realidad son valores significativos en el modelo.

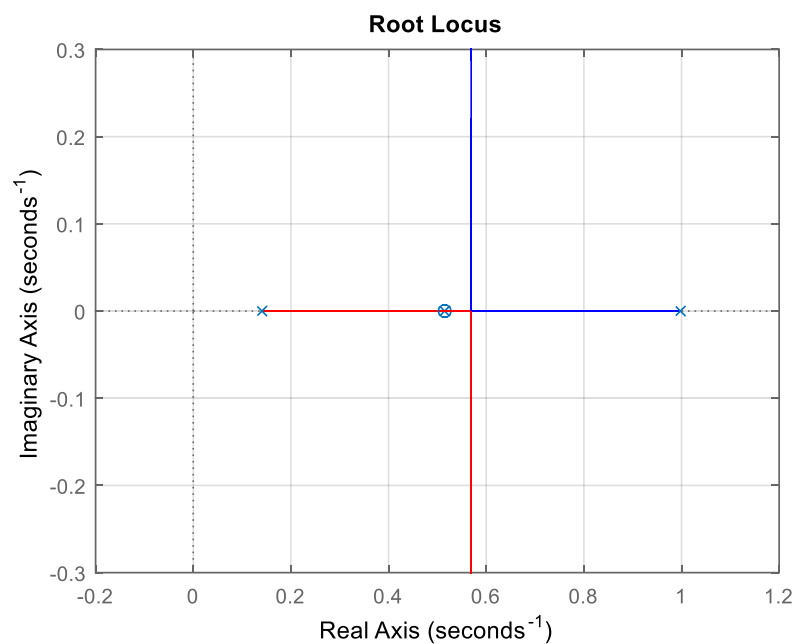


Figura 75. Polos y ceros del modelo calculado

Fuente: Elaboración propia.

El modelo sin A_{23} y A_{32} presenta un polo y un cero en las mismas condiciones siendo estas las raíces principales:

$$P_1 = 0.998$$

$$Z_1 = 0.515$$

Por otro lado se puede apreciar que los polos conjugados en el modelo calculado tienden al infinito, a pesar de estos se puede notar la existencia de polos conjugados en ambos modelos.

Teniendo en cuentas esto se puede afirmar que A_{23} y A_{32} no son valores significativos por lo que las matrices del espacio de estados queda de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9977 & 0.02391 & 0 \\ 0 & 0.1407 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5149 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00122 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [581.7 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = 0$$

Haciendo uso de Matlab a partir de las matrices validadas, se puede calcular la función de transferencia, con la cual obtendremos la función de transferencia discretizada con un periodo discreto de 0.1 segundos (Ver anexo E).

$$G_{(s)} = \frac{0.006083 z^2 - 0.0005689 z - 0.005413}{z^3 - 2.867 z^2 + 2.741 z - 0.8741} \quad (46)$$

Aplicando un step a ambos modelos, tanto continuo como discreto se obtiene las siguientes gráficas:

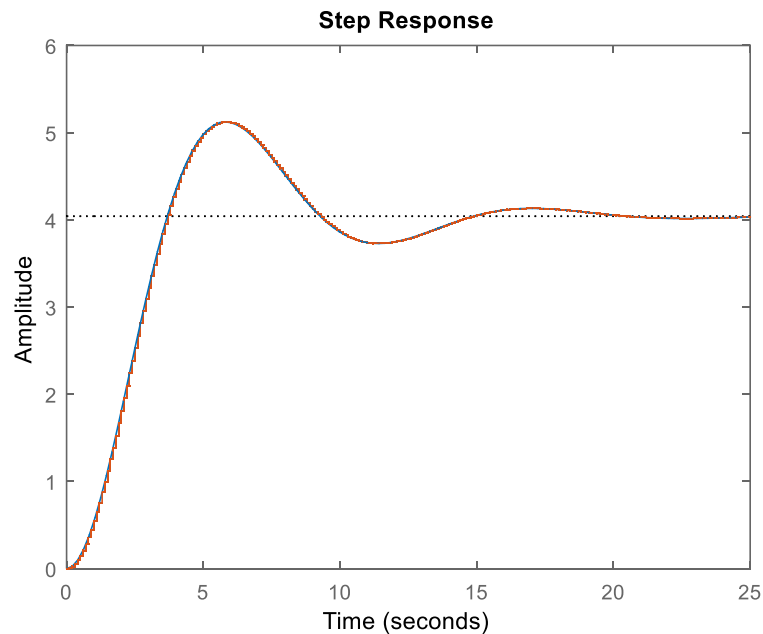
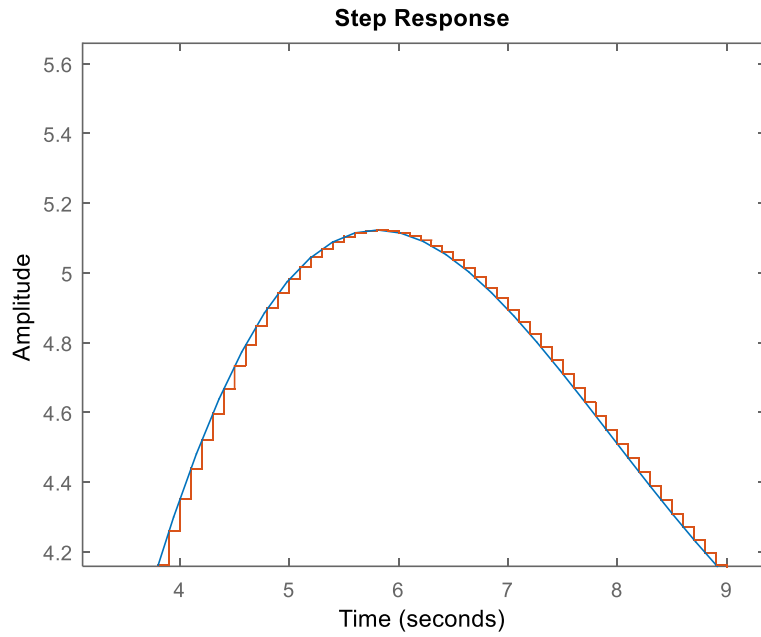


Figura 76. Respuesta del modelo a un Step.

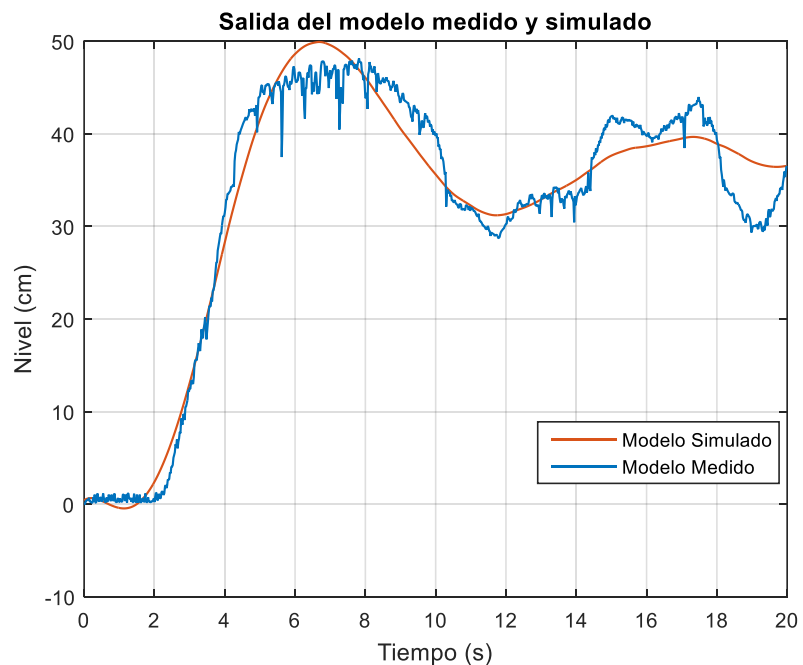
Fuente: Elaboración propia.

Para un periodo 0.1 de discretización, haciendo una ampliación en la región del sobreimpulso se puede apreciar dicho comportamiento.



*Figura 77. Sobreimpulso en la respuesta del modelo a un Step.
Fuente: Elaboración propia.*

Aplicando la señal de entrada que se usó para identificar al sistema al sistema identificado se obtiene un comportamiento próximo al comportamiento medido.



*Figura 78. Modelo medido y modelo simulado
Fuente: Elaboración propia.*

Con las pruebas realizadas y con los resultados que se muestran en la *figura 78*, se puede dar por válido el modelo del sistema.

5.2.3. Modelo de control

El diagrama de bloques en el dominio de Laplace en el Anexo F. A continuación, se presenta el diagrama de bloques en sistema de control en el dominio del tiempo:

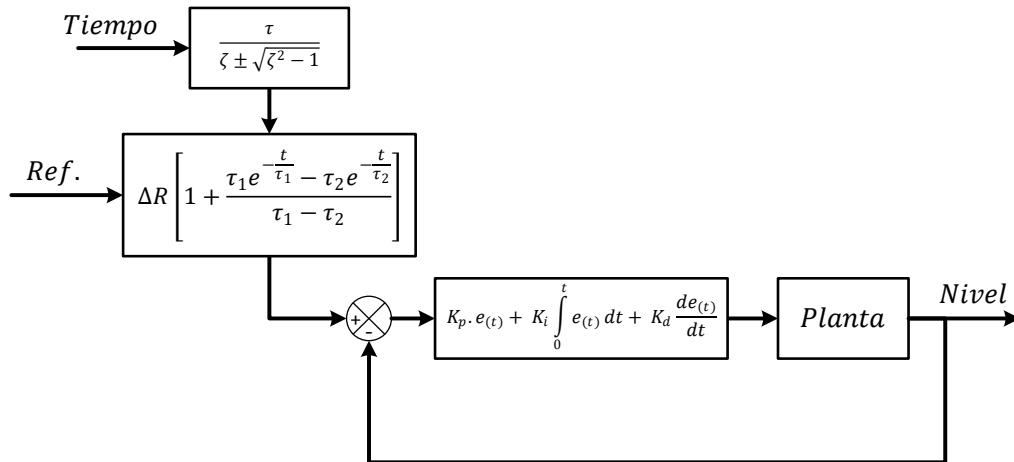


Figura 79. Diagrama de bloques en el dominio del tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Le diagrama de bloques del sistema discreto es:

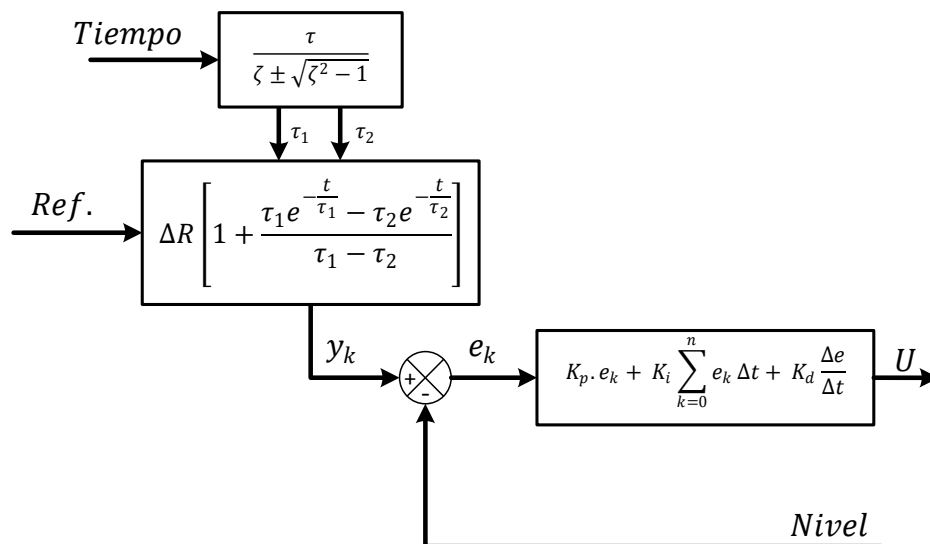


Figura 80. Diagrama de bloques en el dominio del tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Como se vio en el proceso de identificación el sistema manifiesta un incremento del tiempo discreto desde su inicio a partir de los 2 segundos por lo que en ese instante es donde se introduce la referencia.

Como el modelo de control implementado se realizó una primera prueba. En la *figura 81* se puede apreciar un tiempo en que la esfera no se eleva, este comportamiento no es un tiempo muerto dado que solo se manifiesta en el arranque.

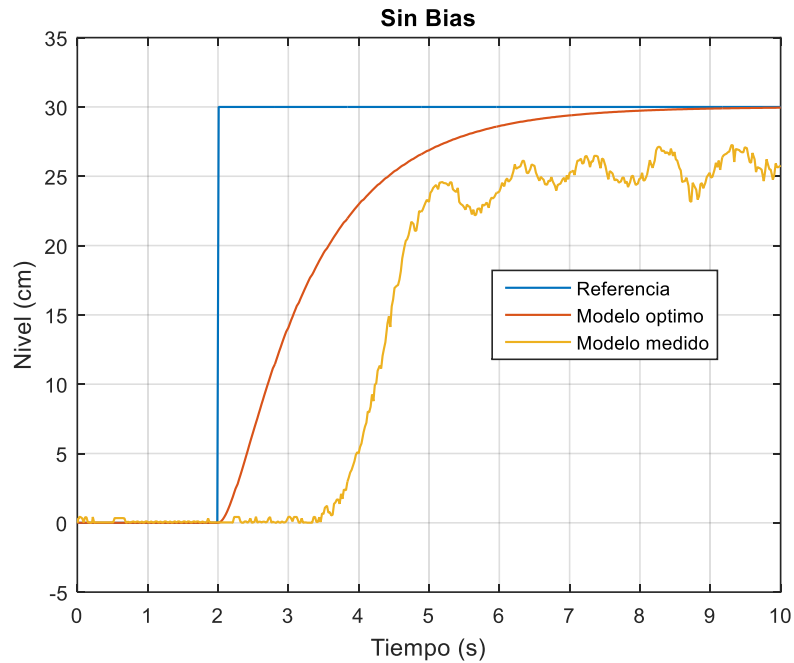


Figura 81. Respuesta del sistema sin factor de corrección.

Fuente: Elaboración propia.

Para dar una solución se aplica un bias (factor correctivo).

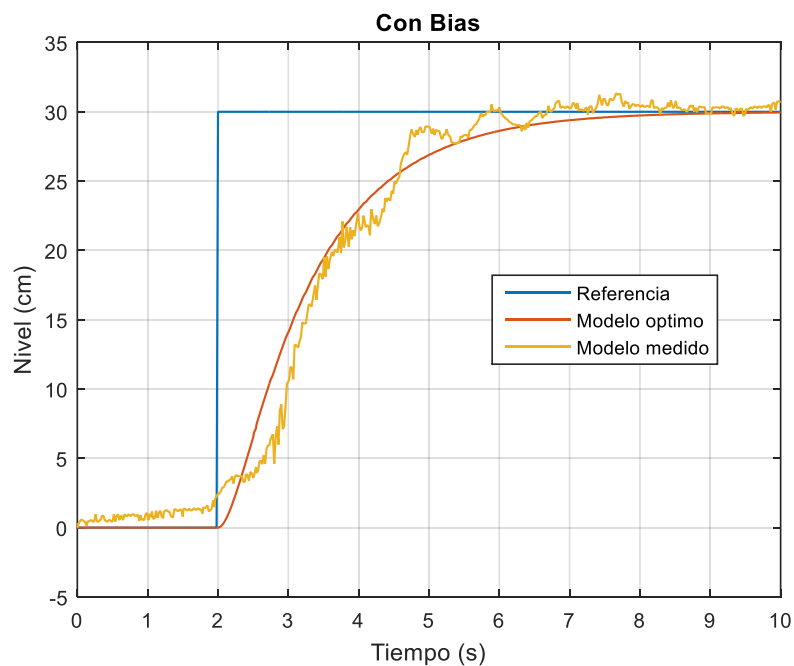


Figura 82. Respuesta del sistema con factor de corrección

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos de la prueba completa del valor correctivo se muestran en el Anexo H. Entonces el diagrama de bloques de control queda de la siguiente manera:

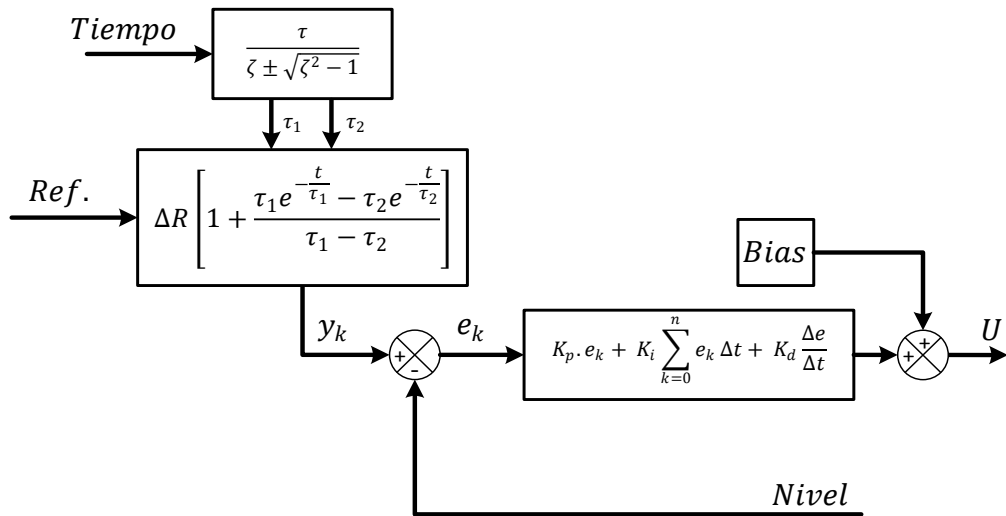


Figura 83. Diagrama de bloques en tiempo discreto con bias

Fuente: Elaboración propia.

La última tapa es la implementación de un filtro que se comporta como un observador de la variable de nivel.

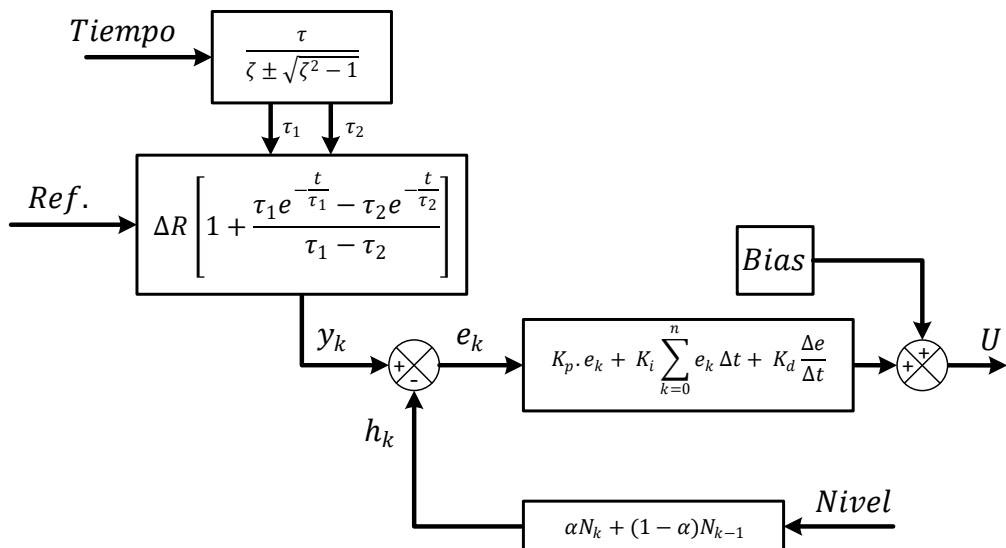


Figura 84. Diagrama de bloques en tiempo discreto completo

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Pruebas:

Con la lógica de control se pasó a hacer pruebas en el sistema físico. Se realizaron las pruebas con variaciones de referencia controladas.

Para K_{ff} igual a 0.1, la respuesta no se aproxima a la respuesta óptima.

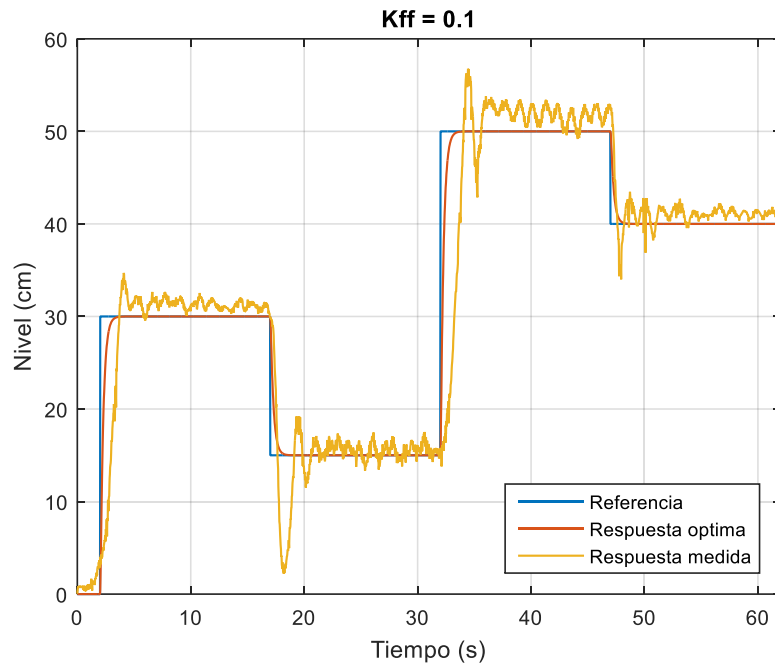


Figura 85. Prueba para K_{ff} igual a 0.1

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de K_{ff} igual a 0.2.

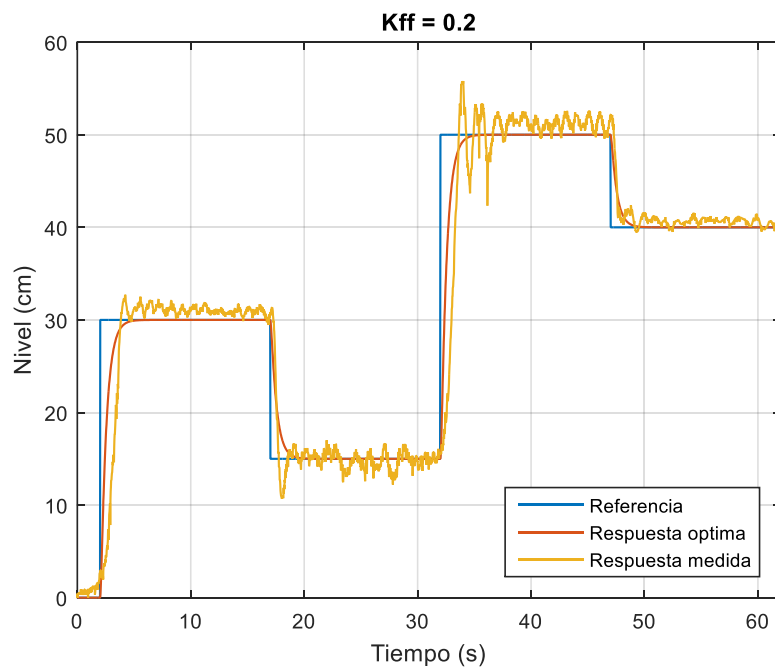


Figura 86. Prueba para K_{ff} igual a 0.2

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de K_{ff} igual a 0.3, la respuesta es próxima al modelo óptimo pero manifiesta cambios violentos en la respuesta.

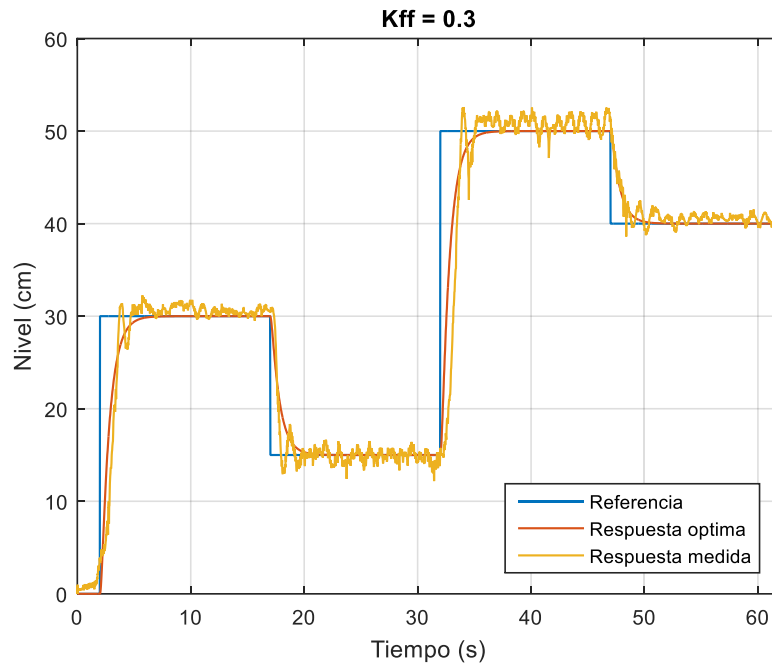


Figura 87. Prueba para K_{ff} igual a 0.3

Fuente: Elaboración propia.

Con un valor de K_{ff} igual a 0.4 la respuesta ya corresponde al modelo óptimo.

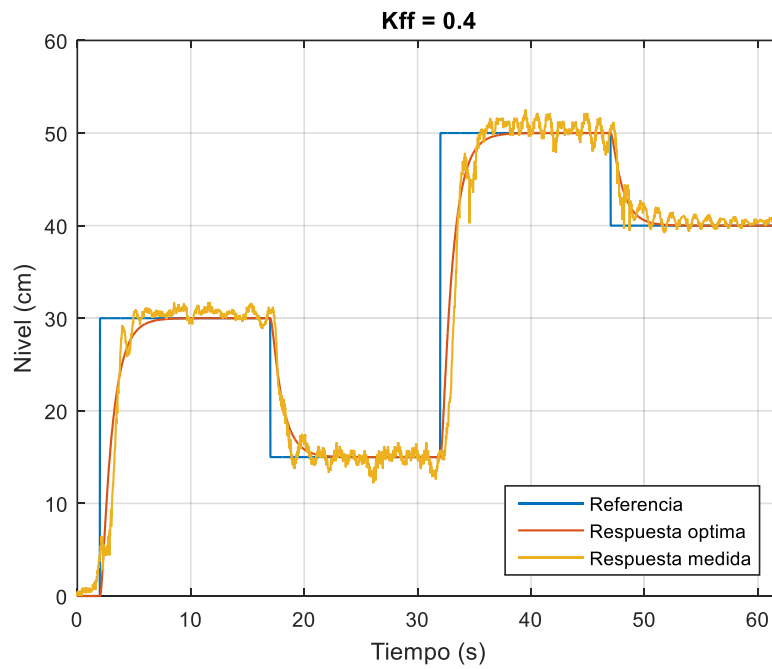


Figura 88. Prueba para K_{ff} igual a 0.4

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 0.5$

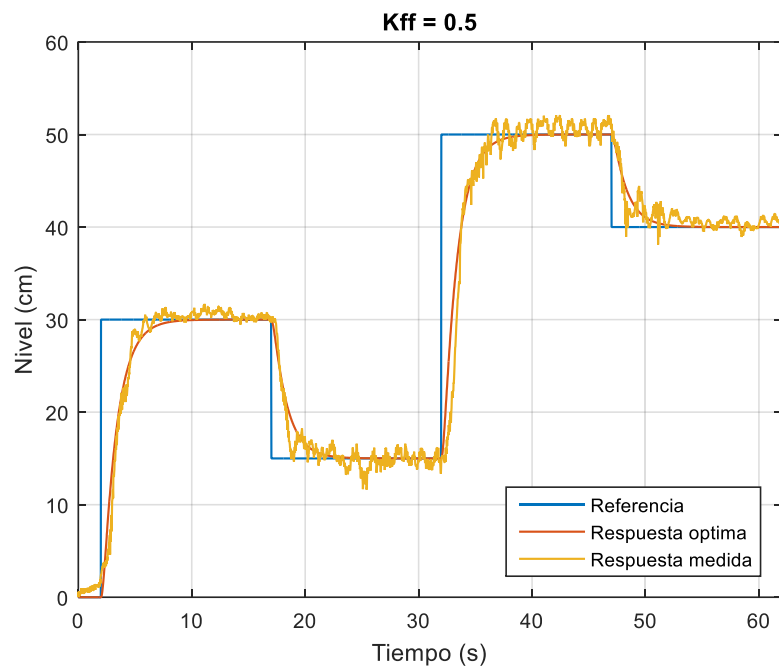


Figura 89. Prueba para K_{ff} igual a 0.5

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 0.6$

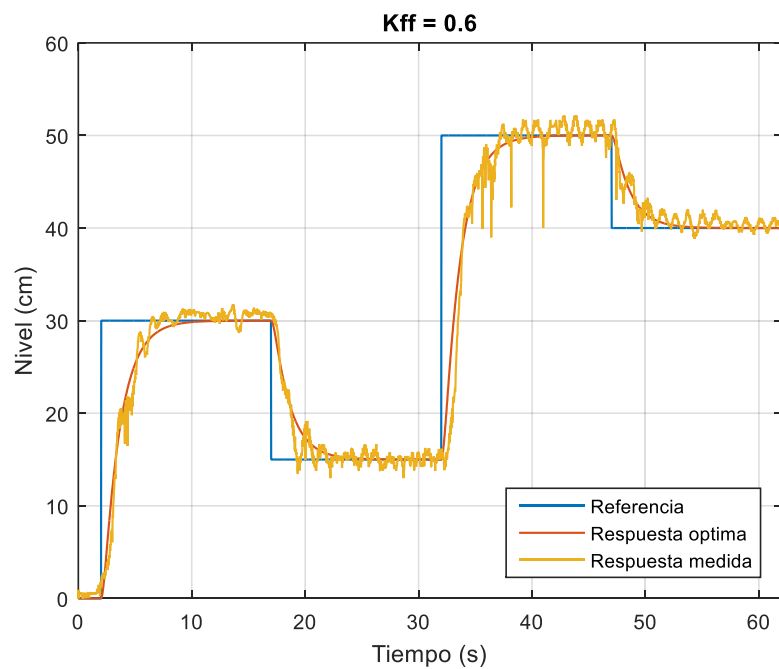


Figura 90. Prueba para K_{ff} igual a 0.6

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 0.7$

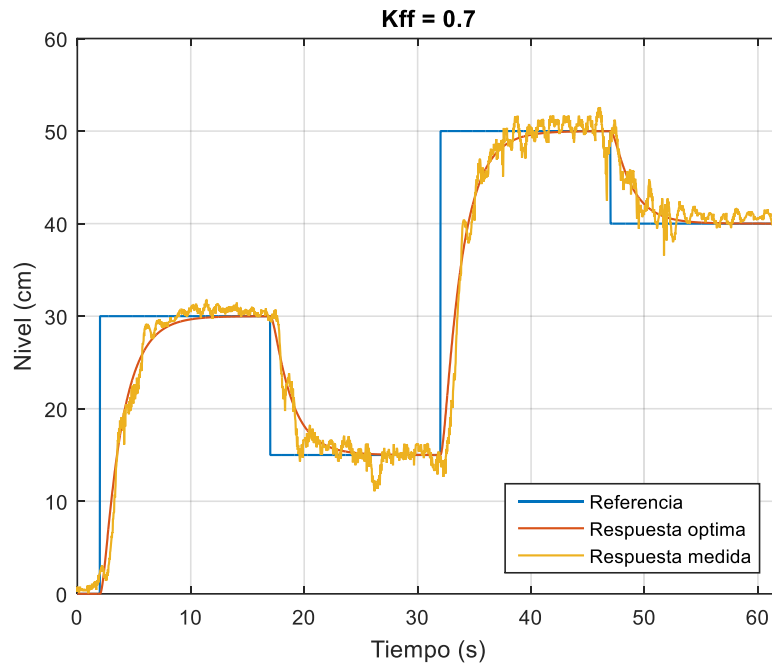


Figura 91. Prueba para K_{ff} igual a 0.7

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 0.8$

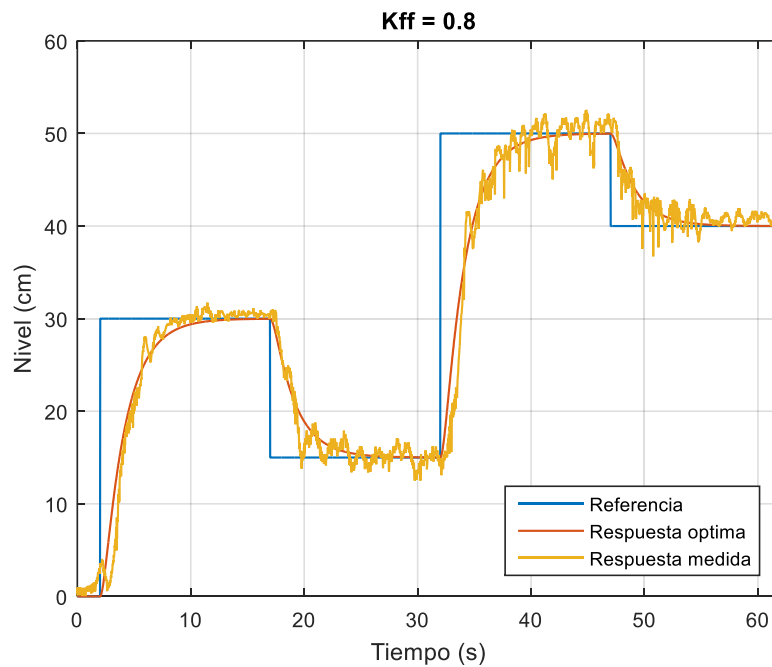


Figura 92. Prueba para K_{ff} igual a 0.8

Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 0.9$

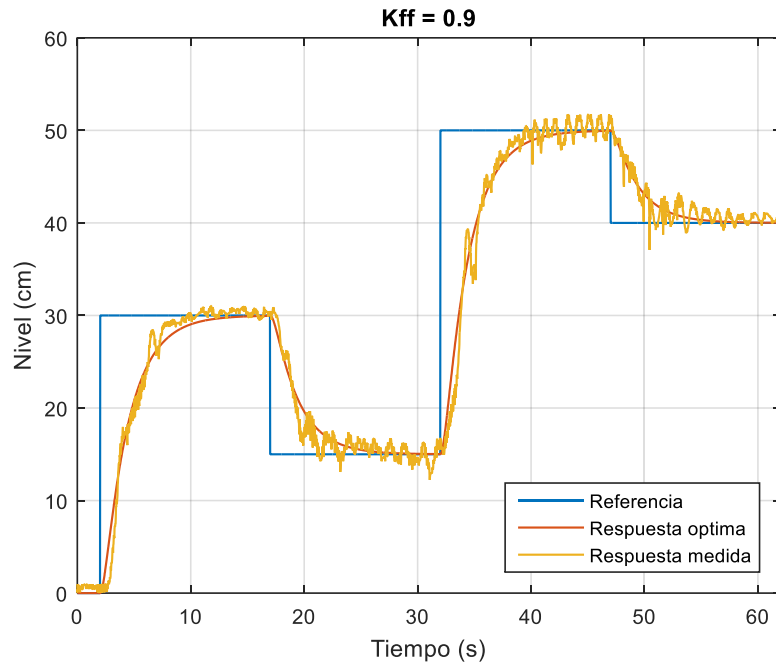


Figura 93. Prueba para K_{ff} igual a 0.9
Fuente: Elaboración propia.

Para un valor de $K_{ff} = 1$

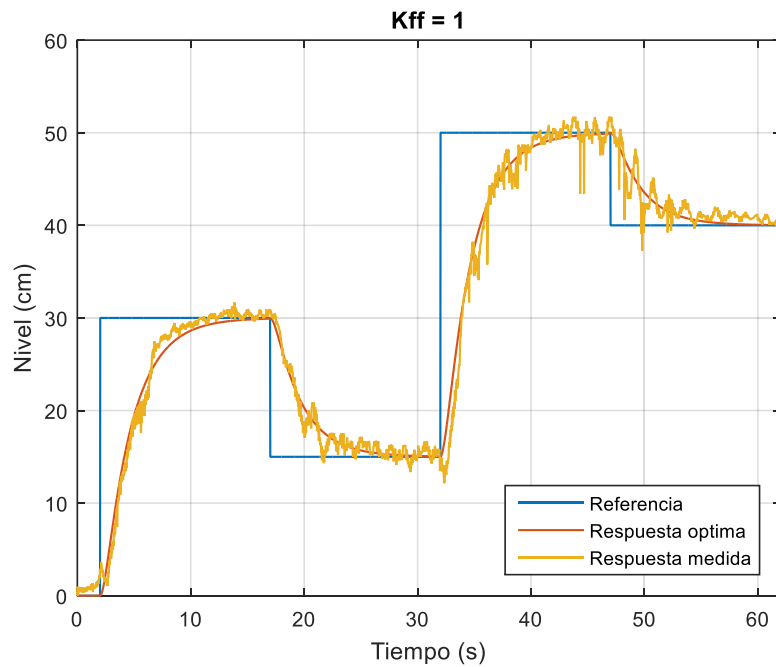


Figura 94. Prueba para K_{ff} igual a 1
Fuente: Elaboración propia.

5.4. Discusión de Resultados

La implementación del módulo contempló el diseño de un HMI que permite ingresar las 5 variables de control (2 de referencia y 3 de las constantes de control del PID), dichas variables permiten generar cambios en la dinámica del sistema esto se puede apreciar en las pruebas realizada (*Ver anexos H*).

Dentro de la lógica de control se logró implementar el modelo Skyhook – damper, que es compatible con el sistema tubo – esfera dicho análisis de implementación se puede apreciar en el *capítulo IV*.

El desarrollo del control PID se analizó desde un punto de vista discreto, y en el dominio del tiempo, esto debido a que el controlador seleccionado (Arduino).

En el análisis de la solución se optó por el uso de un Arduino como controlador, debido a esto es que el proceso de desarrollo del controlador se realizó mayormente en el dominio del tiempo y no en el dominio de Laplace.

Tanto el diagrama de flujo (*Ver anexos B*) como el diagrama de bloques (*ver figura 84*) se reflejan en el código de Arduino (*Ver anexo G*) que se implementó, lo que muestra una relación directa entre la teoría y la práctica, dado que los procesos del diagrama de bloque tienen su sustento en el *capítulo IV*.

5.5. Conclusiones

1. Por parte del diseño del sistema se concluye que el diseño de la estructura del sistema permite ingresar las variables de control y debido a las características del sistema los cambios en las variables de control se perciben con mayor claridad.
2. Se concluye que el modelo Skyhook – Damper es compatible con el sistema de levitación tubo – esfera, al ser el modelo de segundo grado se pudo determinar las soluciones y poder representar la curva de respuesta en el dominio del tiempo.
3. Se determinó la lógica de control con un factor de discretización para el control PID debido a que el elemento de control era un Arduino.
4. Debido a que se hizo uso de una placa de Arduino se realizó el análisis del modelo óptimo en el dominio del tiempo, dado que los periféricos de control trabajan en un dominio temporal.
5. Cada elemento del control implementado se puede explicar directamente con el análisis realizado, así se concluye que se logró generar un vínculo directo

entre la teoría con la implementación del controlador para el sistema tubo – esfera.

5.1. Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis del modelo y/o una nueva identificación del sistema en caso de que se modifique el diseño mecánico.

Se recomienda respetar los requerimientos de los elementos del sistema presentados en el *Capítulo IV*, un cambio en estas condiciones puede alterar las características del sistema.

Se recomienda en caso de replicar el prototipo, analizar si se requiere de la prestación completa del controlador presentado en este trabajo.

5.2. Trabajos futuros

A continuación, se dan a conocer algunos trabajos que pueden nacer de este proyecto de investigación o en su defecto que aportan conocimiento dentro del área y temática de desarrollo:

- ✓ Realizar un estudio del comportamiento independiente de los controladores (feedforward y feedback) y ver la influencia de cada uno resaltando las ventajas y desventajas de cada uno.
- ✓ Tomar como punto de partida la identificación teórica del sistema para poder hacer uso de herramientas de sistema para la determinación de la función de transferencia o espacios de estados de sistemas dinámicos.
- ✓ Desarrollar proyectos basados en el control del tiempo de respuesta, centrándose en las ecuaciones y en el control feedforward. Dado que en el entorno donde se desarrolló la presente tesis, se puede afirmar que los controladores implementados casi en su totalidad del tipo feedback.
- ✓ En caso de que se desee ampliar el campo de estudio de la ingeniería de control, se puede partir de la validación del modelo presentado, para así poder incorporar controladores difusos, robustos, basados en una red neuronal y/o sus variantes.

BIBLIOGRAFÍA






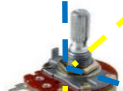

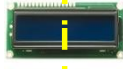


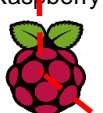

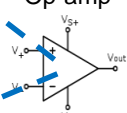



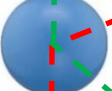



- [1] Fuertes Paucar, Yossi Giovanni. Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- [2] Meneses Morales, Pavel y Zafra Siancas, Henry Daniel. Diseño e implementación de un módulo educativo para el control del sistema bola y varilla. Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú, 2013.
- [3] Parra Quispe, Aníbal Arturo. Diseño e implementación de controladores PID industriales. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007.
- [4] Cerezo López, Yolanda. Contribución al diseño y sintonía de controladores PID discretos en sistemas muestreados de forma no convencional. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2011.
- [5] Jiménez Benalcázar, Jorge Daniel y Benavides Caguasango, Hugo Armando. Diseño y construcción de tres módulos didácticos para medición y control de temperatura. San Miguel de Ibarra: Universidad Técnica del Norte, 2017.
- [6] Bello, Diego, y otros. Planta robusta de levitación neumática para investigación y formación en control y visión artificial. Bogotá: tekne, 2013. 10.
- [7] Hernández Miguel, Irving Ulises, y otros. Diseño, construcción y control de un sistema de levitación neumática. Oaxaca: Pistas Educativas, 2015. 112.
- [8] Rairán Antolines, José Danilo, Chiquiza Quiroga, Diego Fernando y Parra Pachón, Miguel Ángel. Implementación de neurocontroladores en línea, Tres configuraciones, tres plantas. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2012. 1-72-176-09.
- [9] McDonald, Kirk T. Levitating Beachballs. Princeton: Joseph Henry Laboratories, Princeton University, 1994. NJ 08544.
- [10] Delfosse, Verónica y Gural, Alejandra. Estudio Experimental de la Ecuación de Bernoulli. Buenos Aires: Universidad Nacional de General San Martín, 2005.
- [11] Ovejero Sánchez, Jesús y Medina Domínguez, Alejandro. Leyes de Newton y sus aplicaciones. Salamanca: Departamento de Física Aplicada. Universidad de Salamanca, 2010 (pp. 4, 7).
- [12] Airtec. Ventiladores Centrífugos. Tecnología En Ventilación. [En línea] 04 de Mayo de 2012. [Citado el: 21 de Agosto de 2018.] <http://www.airtecv.com/ventiladores-centrifugos/>.
- [13] Airtec. Presión Estática. Tecnología En Ventilacion. [En línea] 2 de Mayo de 2012. [Citado el: 22 de Agosto de 2018.] <http://www.airtecv.com/presion-estatica/>.
- [14] 5hertz. Sensores Ultrasónicos De Proximidad. 5hertz electrónica. [En línea] 2018. [Citado el: 23 de Agosto de 2018.] https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&-tutorial_id=4.

- [15] Arduino. Arduino Products. [En línea] Arduino.cc, 2018. [Citado el: 29 de Agosto de 2018.] <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>.
- [16] Raspberry Pi. Raspberry Pi About Us. [En línea] Raspberry Pi Foundation, 2018. [Citado el: 30 de Agosto de 2018.] <https://www.raspberrypi.org/about/>.
- [17] Microchip. PIC16F18875. [En línea] Microchip Technology Inc., 2018. [Citado el: 30 de Agosto de 2018.] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F18875#additional-features>.
- [18] Microchip. Curiosity High Pin Count (HPC) Development Board. [En línea] Microchip Technology Inc., 2018. [Citado el: 30 de Agosto de 2018.] <http://www.microchip.com/developmenttools/ProductDetails/DM164136#additional-summary>.
- [19] Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. Quinta edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010 (pp. 2, 569, 570 – 571).
- [20] Mazzone, Virginia. Controladores PID. Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes, 2002 (PP. 1 – 2).
- [21] Julián Mantz, Ricardo. Introducción al control óptimo. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2003 (PP. 3 – 4, 5).
- [22] Ramos, C, y otros. Sintonizado del LQR y control predictivo mediante BDU. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [23] Verdés Kairuz, Ramó Imad y González Santos, Ana Isabel. Controladores MPC y PID con autoajuste para un proceso de dinámica rápida a través de MATLAB. La Habana: RIELAC, 2015. 1815-5928.
- [24] Carrillo Paz, Alí José. Sistemas Automáticos de Control, Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado. Santa Rita: Universidad Nacional Experimental “Rafael María Baralt”, 2011 (p. 100).
- [25] Barriga Gamarra, Benjamín. Métodos de diseño en Ingeniería Mecatrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.

Anexo A

Matriz morfológica

La siguiente tabla muestra el esquema para encontrar la solución óptima.

Funciones	Portador de función			
	MDF	Madera balsa	Madera rígida	
F1: Soportar al sistema.				
F2: Guiar a la esfera.	Tubo PVC 	Micas 		
F3: Configurar parámetros.	Potenciómetros 	Teclado matricial 		
F4: Mostrar el nivel.	LCD 16x2 	LCD 20x4 	Sin interfaz de salida	
F5: Controlar el sistema.	Arduino 	Raspberry 	PIC 	Op-amp 
F6: Generar flujo de aire.	Ventilador centrífugo 	Ventilador de presión estática 	Ventilador de flujo de aire 	
F7: Manifiestar el cambio de nivel.	Esfera de plástico 	Esfera de tecnopor 		
F8: Medir el nivel de la esfera.	Sensor ultrasónico 	Sensor Infrarrojo 		

Solución 1

Solución 2

Solución 3

Solución 4

Tabla A.1. Matriz morfológica

Fuente: Elaboración Propia.

Se presentan cuatro soluciones que se analizan con la finalidad de obtener la mejor solución que satisface los requerimientos del sistema.

Criterio técnico y económico	Soluciones				
	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución Ideal
Función	3	4	3	4	4
Confiabilidad	4	3	3	4	4
Diseño	2	3	3	3	4
Fabricación	2	4	4	2	4
Facilidad de replica	2	3	2	2	4
Costo de Implementación	2	3	3	2	4
Total	15	20	18	17	24

Tabla A.2. Evaluación de soluciones

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la tabla 13 de evaluación, la solución más óptima es la número dos. La principal debilidad de esta solución respecto a otras es la confiabilidad, aunque no difiere mucho en puntuación con las demás, pero se debe mencionar que esto se debe a la naturaleza del controlador (*Arduino*) y como se relaciona con los demás elementos.

Dado que al controlador le llevara un tiempo poder ejecutar sus funciones, este tiempo de muestreo puede ser uniforme o no, en algunos casos puede ser hasta aleatorio. [4] Por lo que este periodo de muestreo del *Arduino* debe ser analizado para poder incrementar su confiabilidad.

Anexo B

Diagramas de flujo

El diagrama de flujo general se compone de tres subprocesos:

- ✓ Encender el sistema.
- ✓ Leer entradas del HMI.
- ✓ Ejecutar la lógica de control.

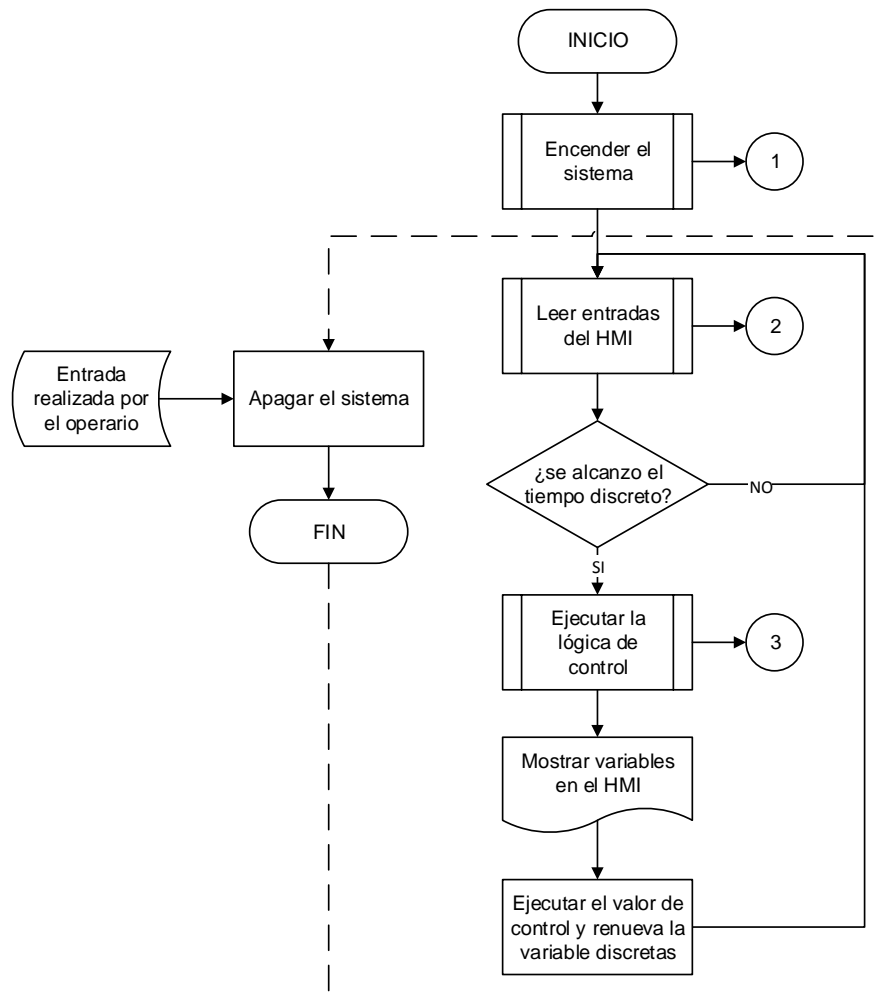


Figura B.1. Diagrama de flujo general

Fuente: Elaboración Propia.

- 1. Encender el sistema:** este subproceso es iniciado por una entrada realizada por el operario, con el sistema encendido se procesa a inicializar las variables de control como: tiempo discreto, constantes de acción PID y Kff, el nivel, entre otros.

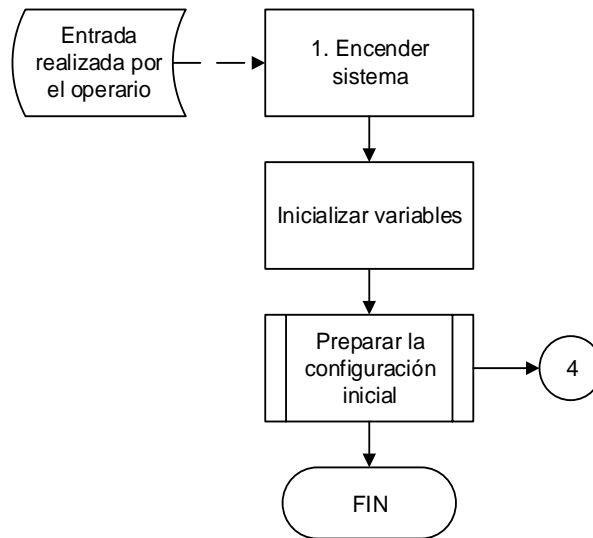


Figura B.2. Diagrama de flujo de “Encender sistema”

Fuente: Elaboración Propia.

Dentro del subproceso “encender sistema” se comprende otro subproceso que es “preparar la configuración inicial”. Se considera un subproceso, debido a que esta se ejecuta al momento de encender el sistema pero corresponde a una sección del código específica (*void setup*).

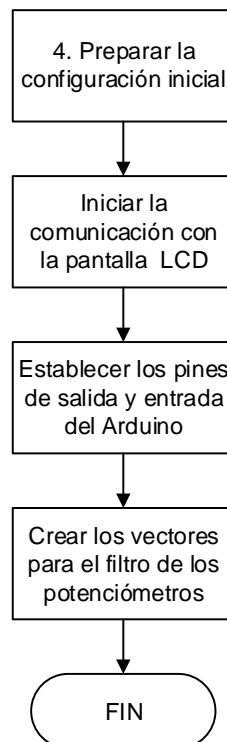


Figura B.3. Diagrama de flujo de “Preparar la configuración inicial”

Fuente: Elaboración Propia.

2. **Leer entradas del HMI:** el subproceso de leer las entradas, comienza tomando la señal de los potenciómetros, una característica de los componentes analógicos, es su sensibilidad al ruido, por lo que la lectura que se toma debe ser filtrada, para luego almacenar los valores.

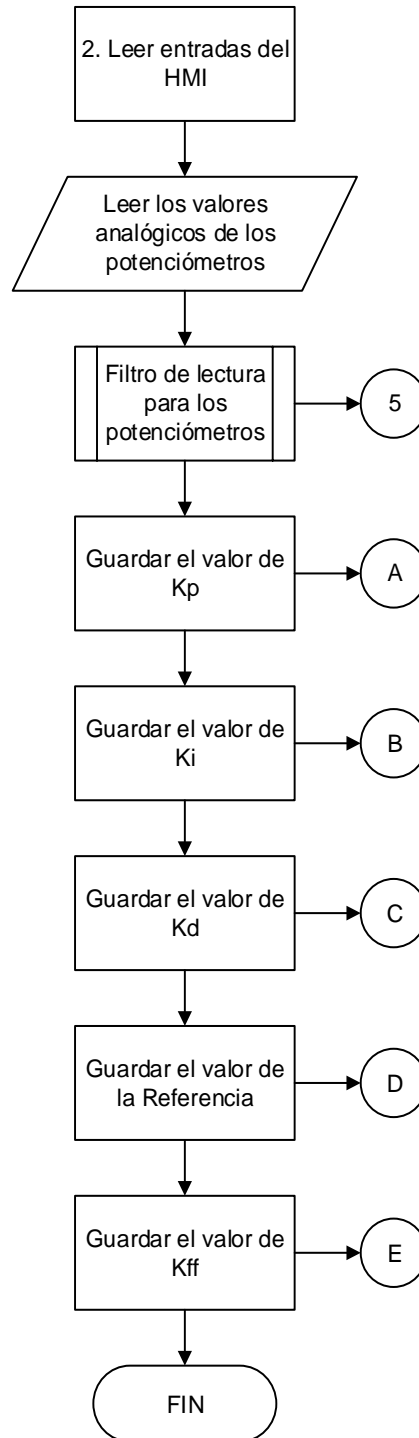


Figura B.4. Diagrama de flujo de "Leer entradas del HMI"

Fuente: Elaboración Propia.

El subproceso de filtro de lectura para los potenciómetros, consta de un proceso de tomar las lecturas (10 lecturas) para luego ser promediadas, esto se conoce como filtro promedio, lineal o vectorial.

El proceso de determinar los valores, K_p , K_i , K_d , K_{ff} y la referencia consiste en escalar los valores de lectura siendo el rango de las lecturas de los potenciómetros de 0 a 1023, por lo que los valores de K_p, K_i y K_d deben tener el rango de 0 a 100, los valores de K_{ff} de 0 a 10 y de la referencia de 0 a 60.

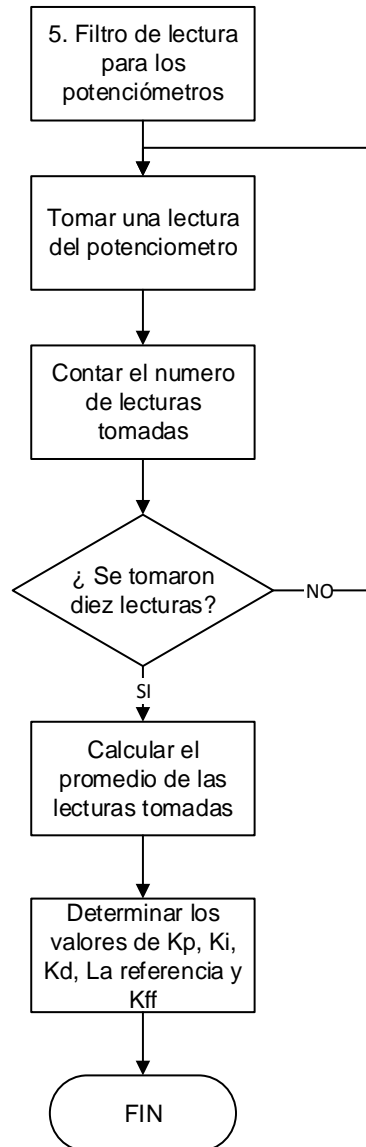


Figura B.5. Diagrama de flujo de "Filtro de lectura para los potenciómetros"

Fuente: Elaboración Propia.

- 3. Ejecutar lógica de control:** Este es el subproceso más importante que contempla el cálculo del comportamiento óptimo, el cálculo de la salida del controlador, condiciones de trabajo, etc.

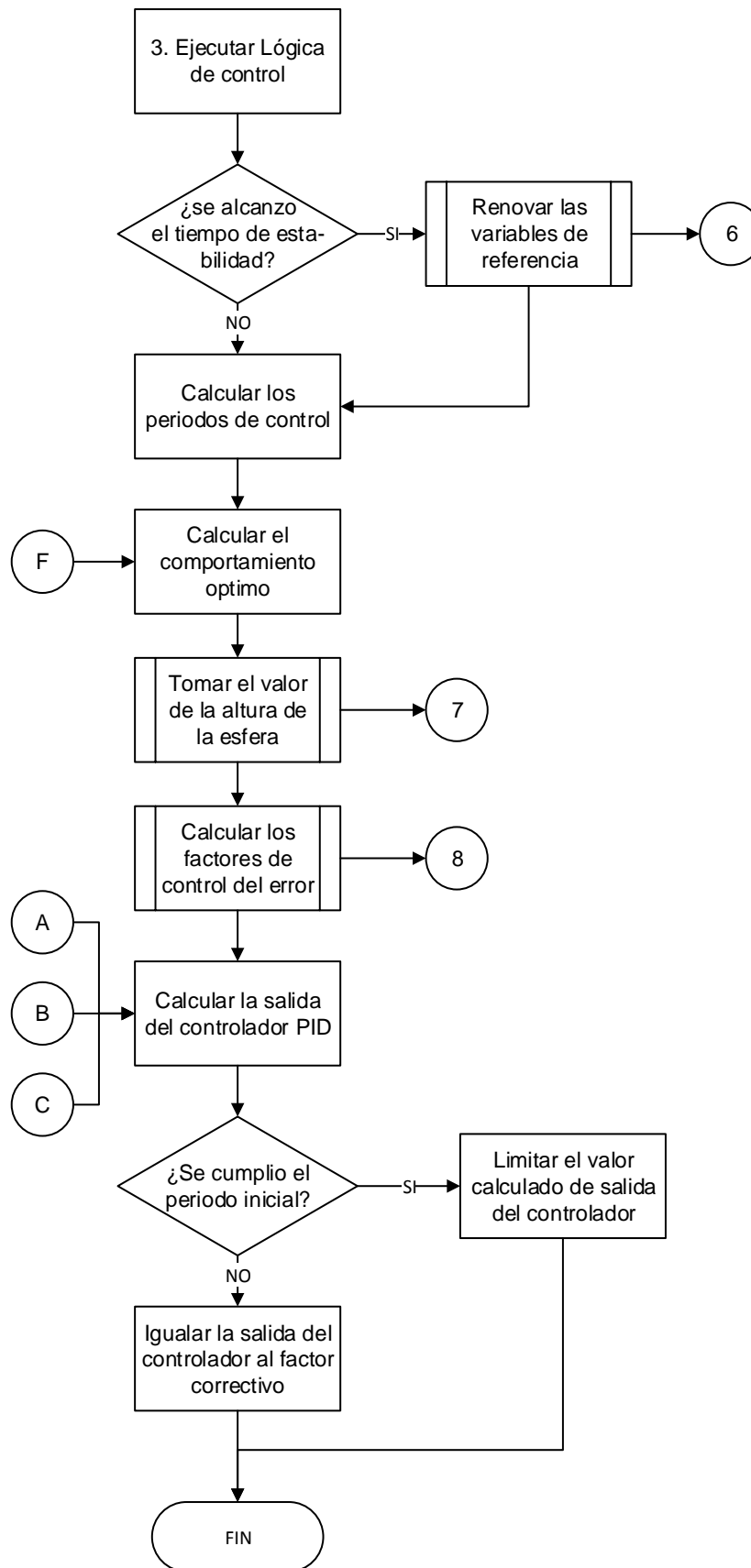


Figura B.6. Diagrama de flujo de "Ejecutar la lógica de control"

Fuente: Elaboración Propia.

Dentro del diagrama de flujo de “Ejecutar la lógica de control” se contemplan tres sub procesos adicionales.

El primero es “renovar las variables de control”, esta es la secuencia que se encarga de renovar las variables del proceso que tienen una relación directa con el control como: la variación de la referencia, el valor de control feedforward, el tiempo en completar un ciclo.

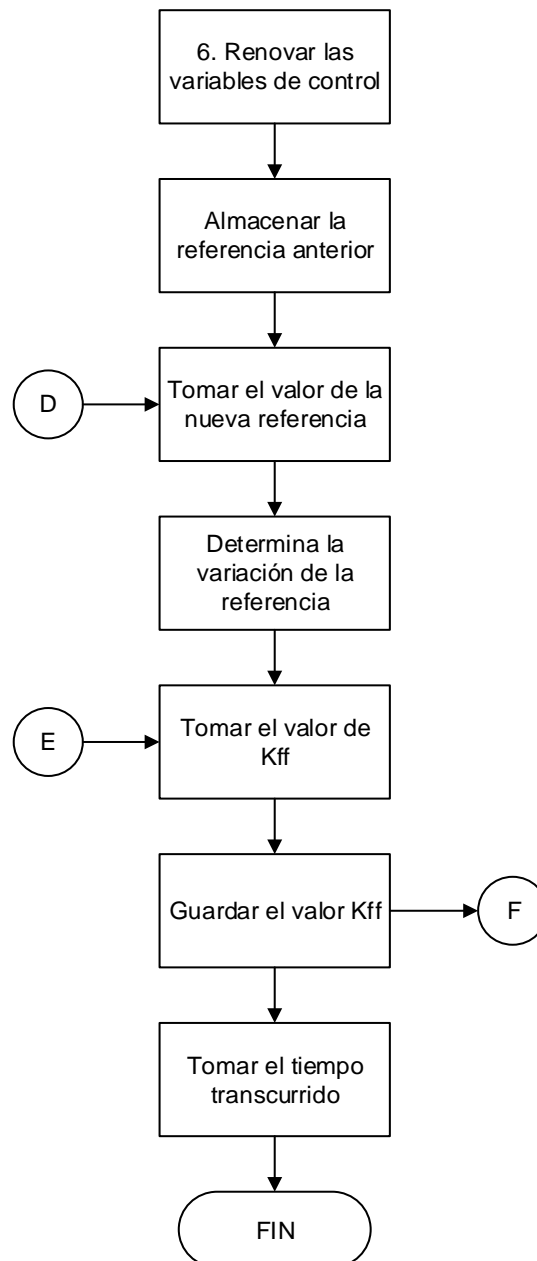


Figura B.7. Diagrama de flujo de “Renovar variables de control”

Fuente: Elaboración Propia.

Otro subproceso importante dentro de la lógica de control es el de “tomar el valor de la lectura de la esfera”. Este subproceso contempla el proceso de

adquisición del dato de distancia por parte del sensor ultrasónico, este valor debe acondicionarse para que se obtenga en valor de la altura actual de la esfera.

Se debe mencionar que durante el proceso de pruebas se tomó la decisión de implementar un observador que trabaje a modo de filtro.

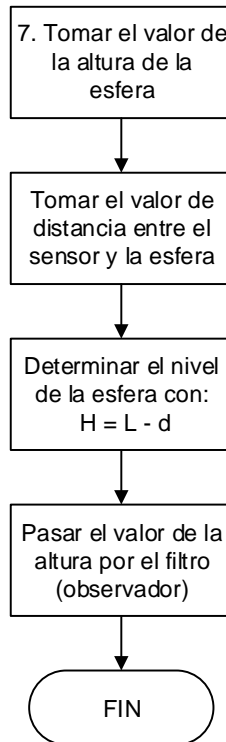


Figura B.8. Diagrama de flujo de "Tomar el valor de la altura de la esfera"

Fuente: Elaboración Propia.

Otra subproceso primordial es el de determinación de los factores de control del error que son el cálculo del error, la derivación e integración de la misma.

Se debe mencionar que el factor integral es un factor a limitar debido a que el proceso de integración, en caso exista error por un tiempo prolongado, este incrementara su valor de acción por encima del límite de acción del controlador, a pesar de que se limite la acción del controlador el factor integral no dejara de incrementarse. Lo que generara tiempo de retraso en la respuesta.

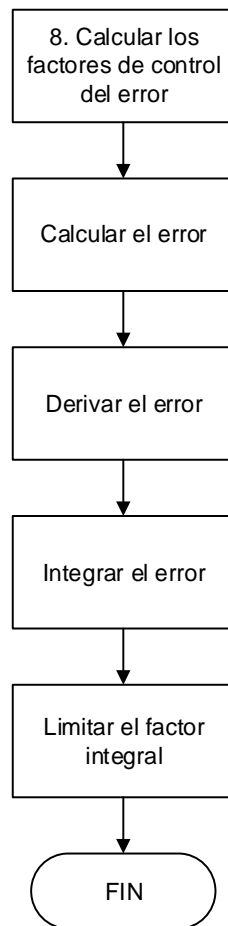


Figura B.9. Diagrama de flujo de “Calcular los factores de control del error”

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo C

Análisis tecnológico

Para la selección del modelo de placa de Arduino se realizó un análisis con la siguiente tabla:

Criterio técnico y económico	Soluciones				
	Arduino UNO	Arduino NANO	Arduino MEGA	Arduino DUE	Solución Ideal
Función	4	4	4	4	4
Confiabilidad	3	3	3	4	4
Portabilidad	3	4	2	2	4
Complejidad	4	4	4	3	4
Productividad	2	3	1	1	4
Costo de la tecnología	3	4	3	2	4
Total	19	22	17	16	24

Tabla C.1. Evaluación de opciones de Arduino

Fuente: Elaboración Propia.

El esquema de pines del Arduino NANO es el siguiente:

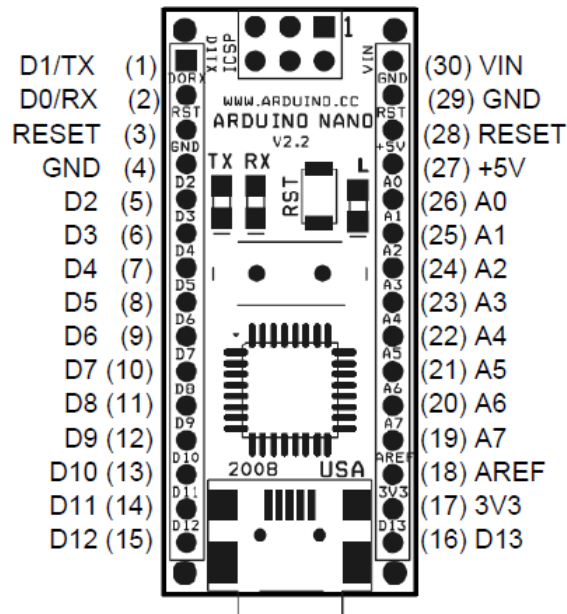


Figura C.1. Pin layout del Arduino NANO

Fuente: Arduino Products.

Anexo D

Análisis del modelo óptimo

Para el análisis del modelo óptimo se programó las siguientes líneas de código, siendo C la variable de amortiguamiento “ ζ ”.

```
close all; clear all; clc;

t = 0.1:0.1:1;      % Tau ~ Kff
C = 1.43;
T = 0:0.01:10;
R = 1;

t1 = t./(C-sqrt(C.^2-1));
t2 = t./(C+sqrt(C.^2-1));

for i = 1:length(t)
    for j = 1:length(T)
        y(i,j) = R*(1 + ((t1(i)*exp(-T(j)/t1(i)) - ...
            t2(i)*exp(-T(j)/t2(i)))/(t2(i)-t1(i))));
    end
end

%% Estabilización en 1 segundo al 98%
figure(1)
stairs(T,y(1,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(101),y(1,101), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([1 1], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 2 segundo al 98%
figure(2)
stairs(T,y(2,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(201),y(2,201), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([2 2], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.2')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 3 segundo al 98%
figure(3)
```

```

stairs(T,y(3,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(301),y(3,301), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([3 3], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color', [.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.3')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 4 segundo al 98%
figure(4)
stairs(T,y(4,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(401),y(4,401), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([4 4], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color', [.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.4')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 5 segundo al 98%
figure(5)
stairs(T,y(5,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(501),y(5,501), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([5 5], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color', [.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.5')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 6 segundo al 98%
figure(6)
stairs(T,y(6,:), 'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(601),y(6,601), 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)), 'k--', 'LineWidth',1.5)
line([6 6], [0 1.05], 'LineWidth',1.5, 'Color', [.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.6')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 7 segundo al 98%
figure(7)
stairs(T,y(7,:), 'LineWidth',1.5)

```

```

hold on
grid on
plot(T(701),y(7,701),'ro','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)),'k--','LineWidth',1.5)
line ([7 7], [0 1.05],'LineWidth',1.5,'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.7')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 8 segundo al 98%
figure(8)
stairs(T,y(8,:),'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(801),y(8,801),'ro','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)),'k--','LineWidth',1.5)
line ([8 8], [0 1.05],'LineWidth',1.5,'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.8')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 9 segundo al 98%
figure(9)
stairs(T,y(9,:),'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(901),y(9,901),'ro','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)),'k--','LineWidth',1.5)
line ([9 9], [0 1.05],'LineWidth',1.5,'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 0.9')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

%% Estabilización en 10 segundo al 98%
figure(10)
stairs(T,y(10,:),'LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(T(1001),y(10,1001),'ro','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10)
plot(T,0.98*ones(length(T)),'k--','LineWidth',1.5)
line ([10 10], [0 1.05],'LineWidth',1.5,'Color',[.8 0 0]);
title('\varsigma = 1.43 y Kff = 1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
axis([0 10 0 1.05])

```

A partir del código anterior se obtuvieron las siguientes gráficas, las cuales son la representación del modelo ideal, estos resultados se obtuvieron con la constante de amortiguamiento igual a 1.43.

Para K_{ff} igual a 0.1 el tiempo de estabilización es de 1 segundo.

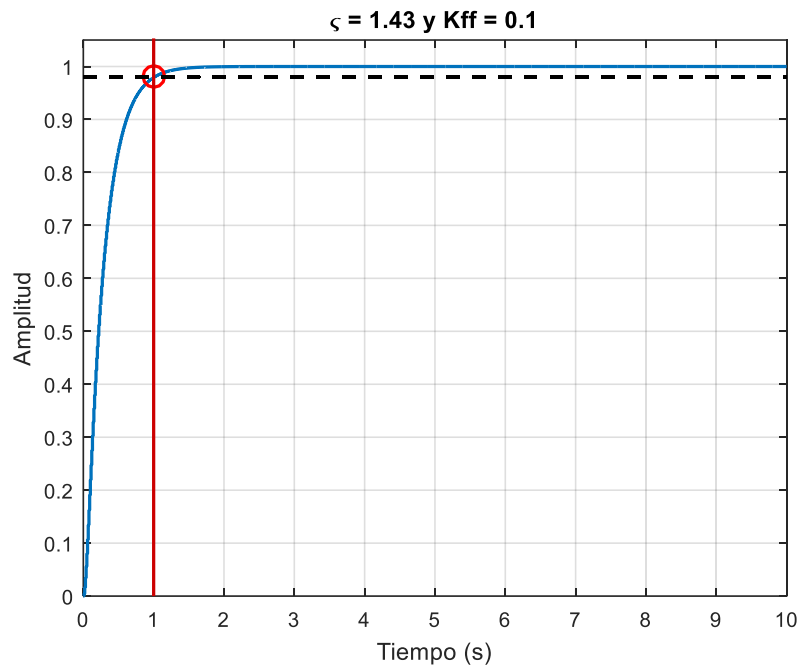


Figura D.1. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.1$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.2 el tiempo de estabilización es de 2 segundos.

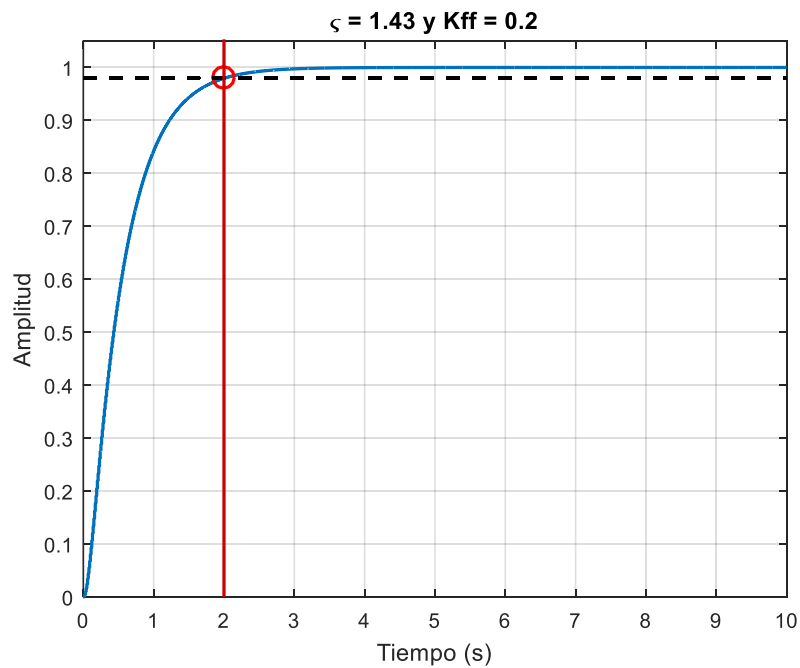


Figura D.2. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.2$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.3 el tiempo de estabilización es de 3 segundos.

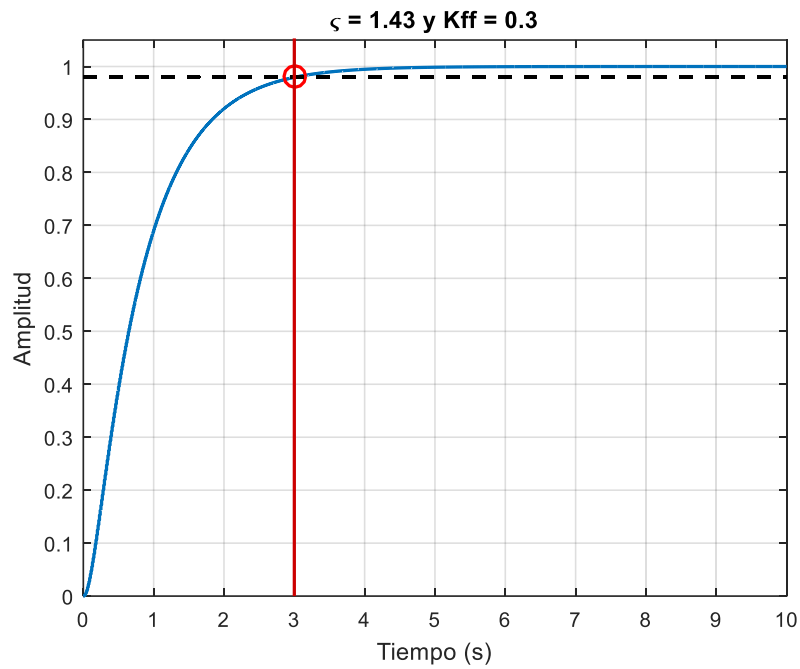


Figura D.3. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.3$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.4 el tiempo de estabilización es de 4 segundos.

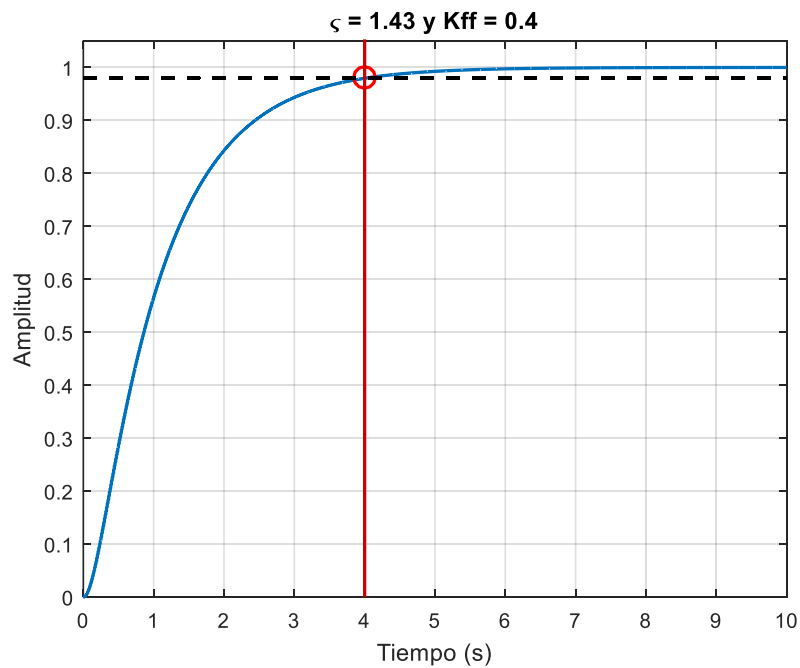


Figura D.4. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.4$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.5 el tiempo de estabilización es de 5 segundos.

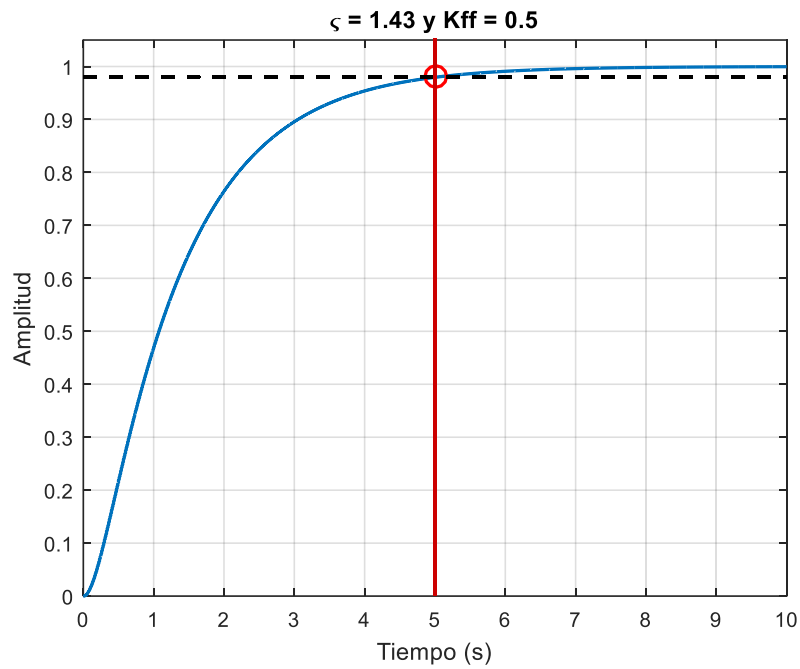


Figura D.5. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.5$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.6 el tiempo de estabilización es de 6 segundos.

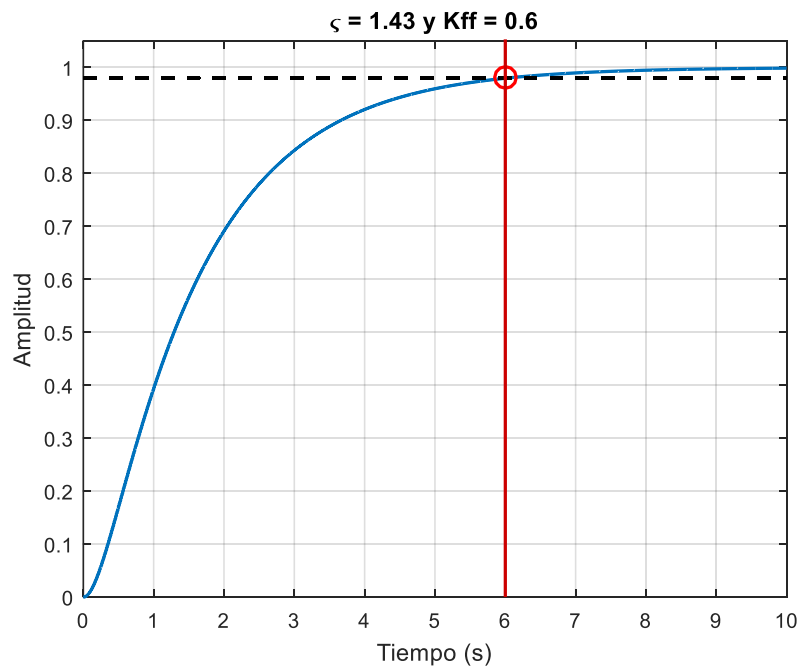


Figura D.6. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.6$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.7 el tiempo de estabilización es de 7 segundos.

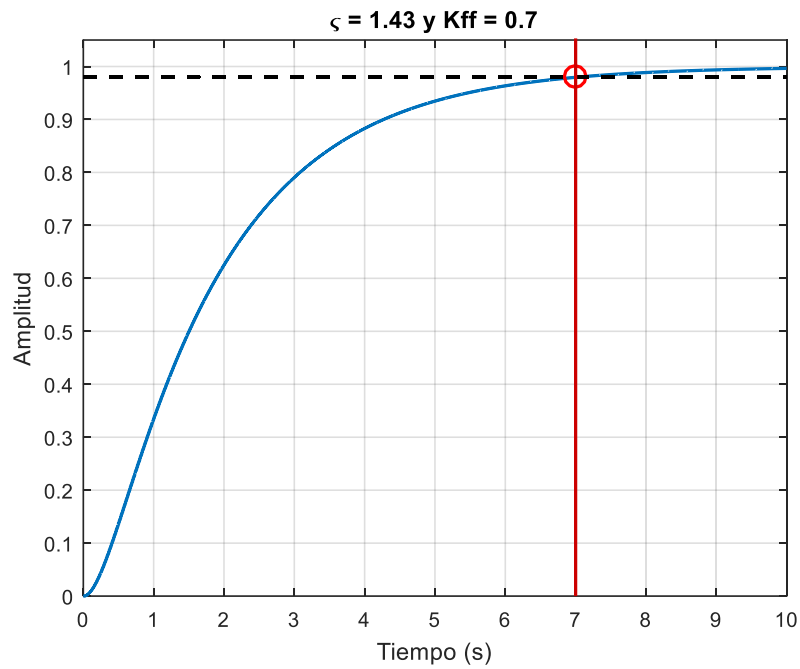


Figura D.7. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.7$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.8 el tiempo de estabilización es de 8 segundos.

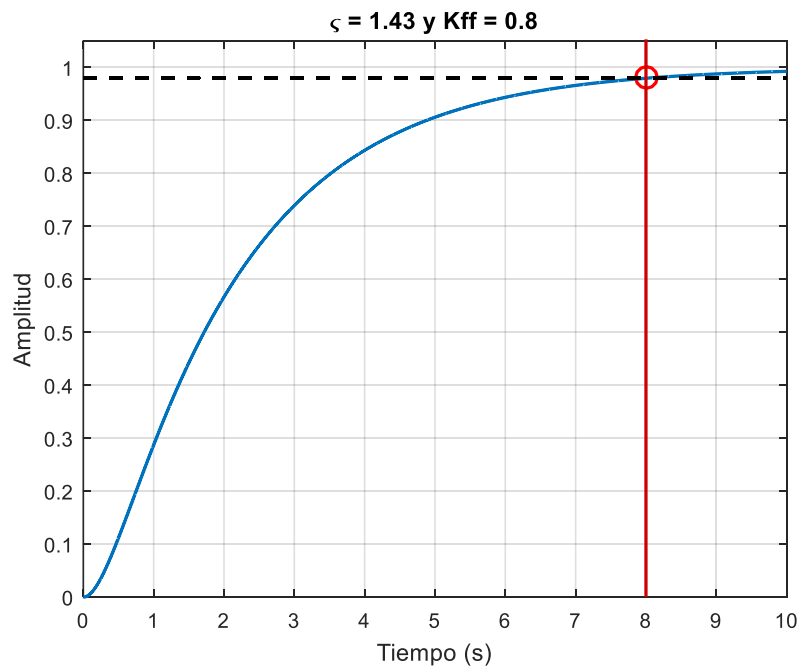


Figura D.8. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.8$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 0.9 el tiempo de estabilización es de 9 segundos.

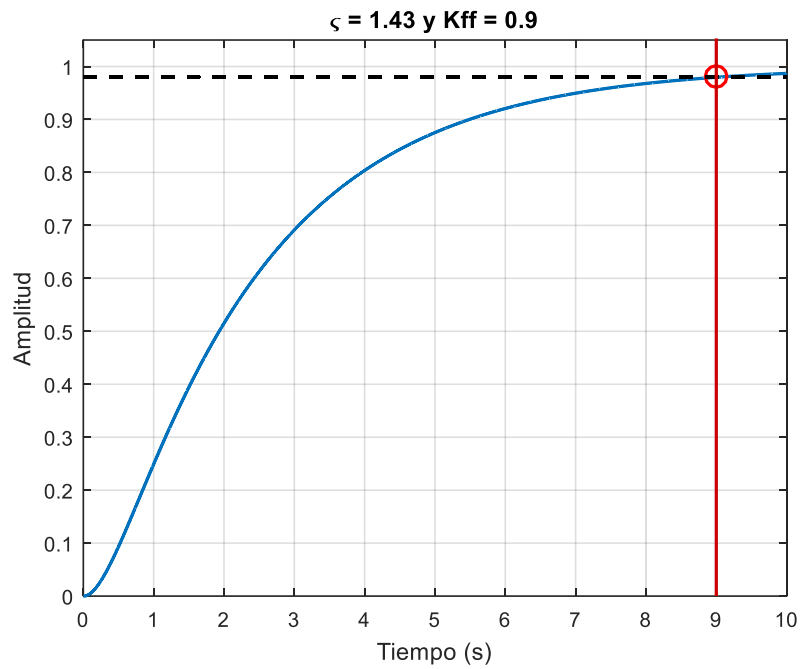


Figura D.9. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 0.9$

Fuente: Elaboración Propia.

Para K_{ff} igual a 1 el tiempo de estabilización es de 10 segundos.

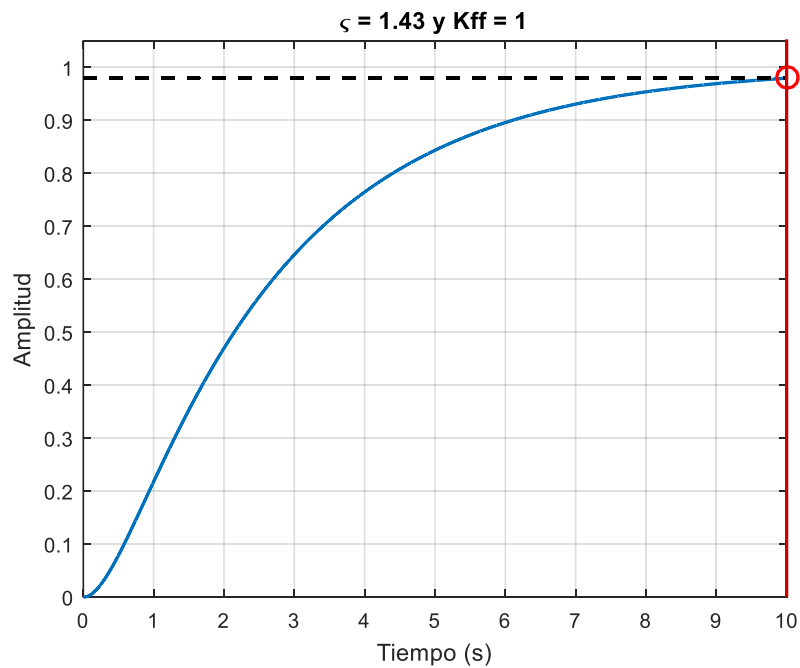


Figura D.10. Respuesta del modelo óptimo con $\zeta = 1.43$ y $K_{ff} = 1$

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo E

Identificación del sistema

Para identificar al sistema se tuvo que tomar datos desde el puerto serial de Arduino con el siguiente código:

```
volatile unsigned long tiempoAnterior;
volatile unsigned long alturaAnterior;
volatile double dT;
int trigPin = 7;
int echoPin = 8;
int Input_n1 = 0;
int paso = 0;
int n = 3;
int n_dato = 0;
long duracion;

int PWM_Actuador = 10;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  pinMode(PWM_Actuador, OUTPUT);

  tiempoAnterior=0;
}

void loop() {

  unsigned long tiempoActual;
  tiempoActual = millis();
  dT = (double)(tiempoActual - tiempoAnterior) ;

  if (dT >= 1) {
    if (paso <= n) {
      paso = paso + 1;
    }
    if (paso > n) {
      paso = 0;
      Input_n1 = random(129,255);
    }
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    duracion = pulseIn(echoPin, HIGH);
    long distancia = duracion/58;
    long altura = 60.56 - distancia;

    n_dato = n_dato + 1;
  }
}
```

```

    if (n_dato <= 100){
        Input_n1 = 255;
    }
    if (n_dato >= 600){
        n = 10;
    }
    if (n_dato <= 1100){
        Serial.print(n_dato);
        Serial.print('\t');
        Serial.print(dT);
        Serial.print('\t');
        Serial.print(Input_n1);
        Serial.print('\t');
        Serial.println(altura);
    }

    analogWrite(PWM_Actuador, Input_n1);
    tiempoAnterior = tiempoActual;
}
}

```

Los datos obtenidos por el puesto serial, se pasaron a un excel para ser importados en Matlab y almacenados en el workspace y salvados con el nombre "Datos_Identificados.mat".

Con el código que se muestra a continuación se acondicionan los datos para la identificación, además se obtuvieron las *figuras 72 y 73*.

```

close all, clear all, clc
load('Datos_Identificados.mat')

figure(1)
plot(T_diferencial)
grid on, grid minor
title('Tiempo discreto')
xlabel('N° de ciclos')
ylabel('Tiempo (ms)')

dT = mean(T_diferencial)
Tiempo = dT*N_dato/1000;
Voltaje = (Input*12)/255;

figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(Tiempo,Voltaje, 'LineWidth',1)
grid on
title('Entrada'),ylabel('Voltaje (V)')
axis([0,20,6,13])

```

```

subplot(2,1,2)
plot(Tiempo, Nivel, 'LineWidth',1)
grid on
title('Salida')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Nivel (cm)')
axis([0,20,0,60])

```

Con los datos acondicionados y almacenados en el workspace, se procede a la identificación del sistema con el toolbox “System Identification”.

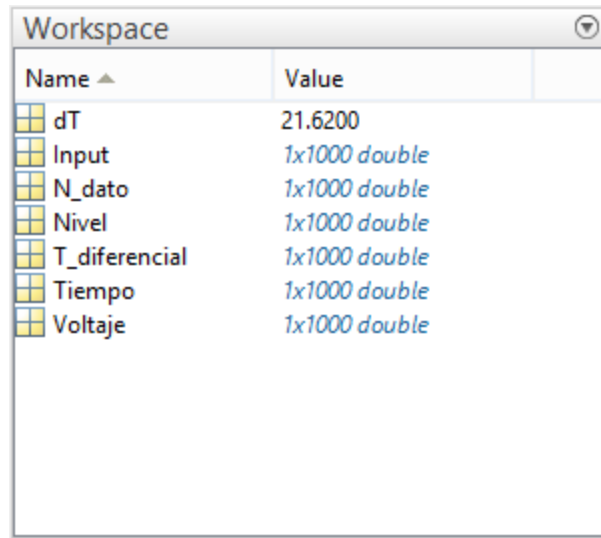


Figura E.1. Datos de identificación en el Workspace

Fuente: Elaboración Propia.

Con el comando “ident” en la ventana de comandos o en la pestaña de apps de Matlab se abre el sistema de identificación.

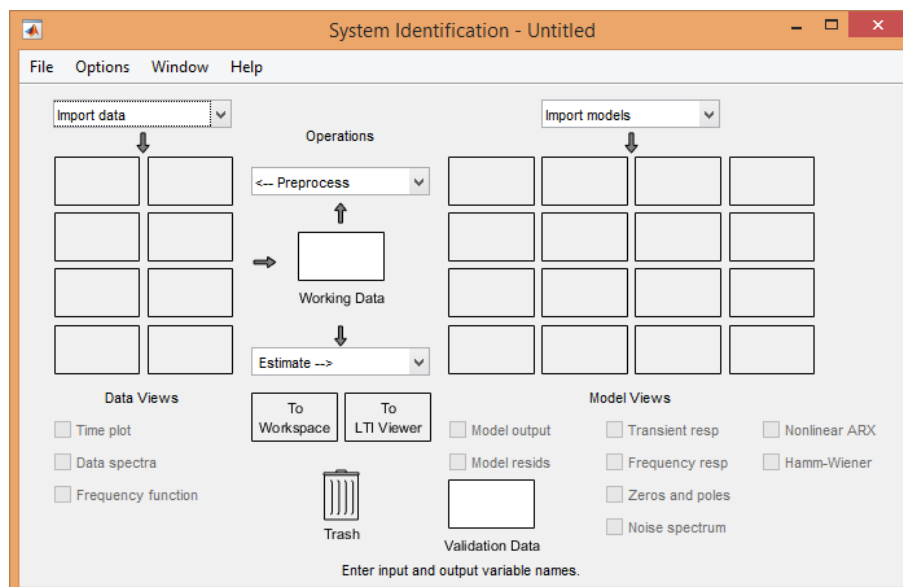


Figura E.2. Pantalla de inicio del “System Identification”

Fuente: Elaboración Propia.

En “file” se importan los datos, según se muestra en la *figura 116* siendo la entrada el Voltaje y la salida el nivel, con un inicio a los 0 segundos con un tiempo discreto de 20ms o 0.02 segundos.

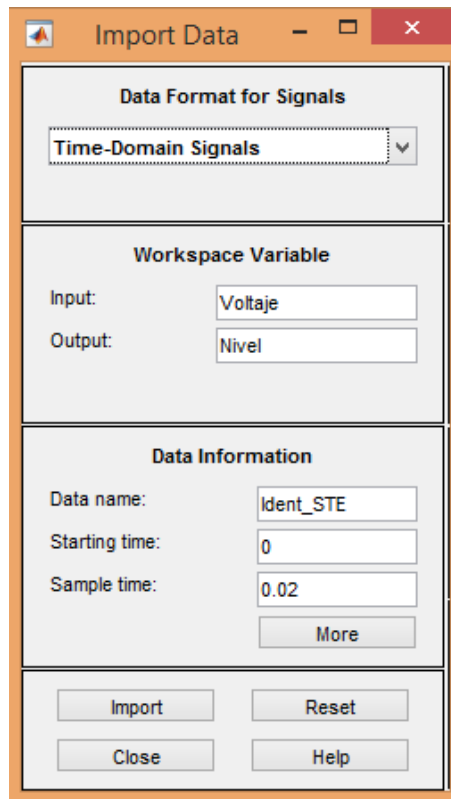


Figura E.3. Importación de datos para la identificación
Fuente: Elaboración Propia.

Importados los datos, se muestran en la parte izquierda de la ventana, a continuación en la pestaña “estimate” se selecciona “State Space Model”.

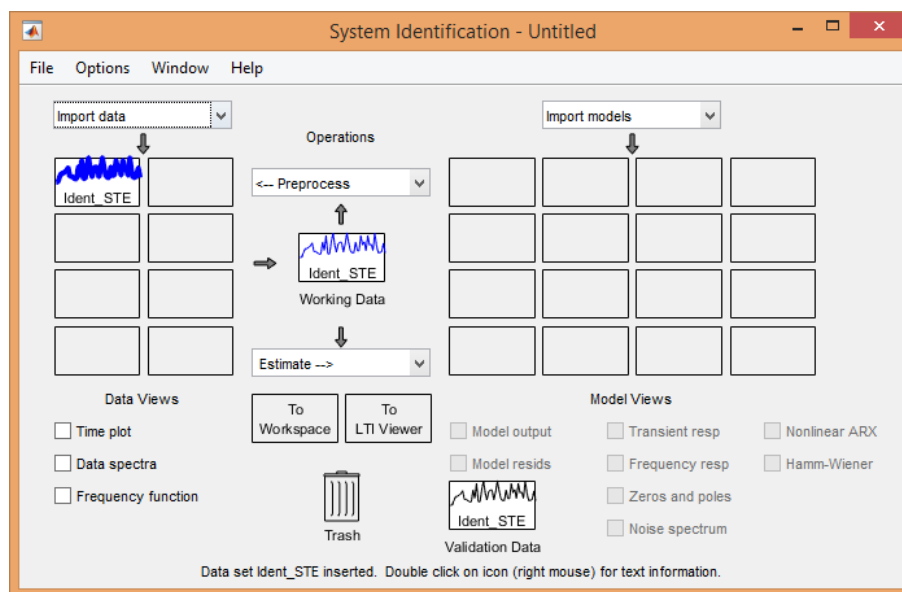


Figura E.4. Datos cargados en el “System Identification”
Fuente: Elaboración Propia.

Con la ventana “State Space Model”, se introduce el orden de la matriz de estados (con los cálculos hechos anteriormente se sabe que el orden es 3).

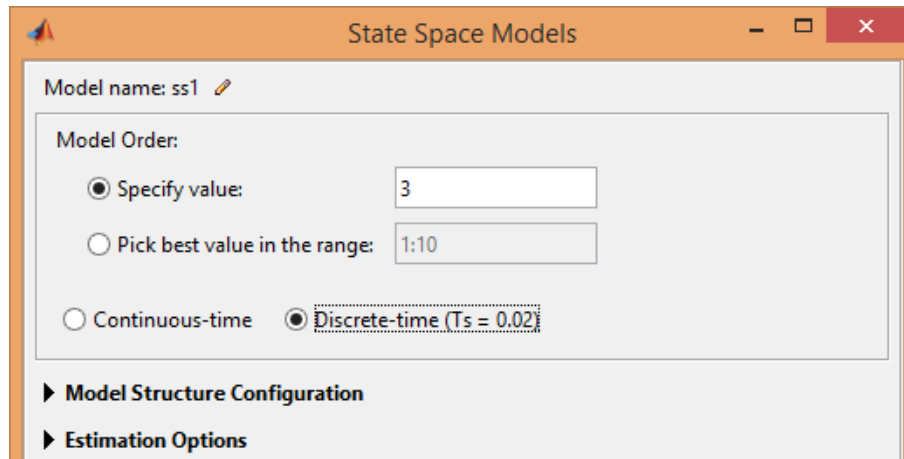


Figura E.5. Pantalla de identificación del espacio de estados del modelo

Fuente: Elaboración Propia.

El proceso de estimación se da para una entrada, una salida y 1000 muestras.

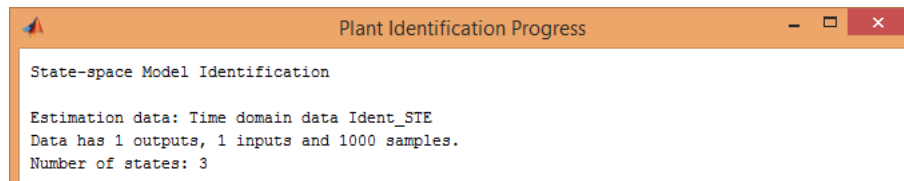


Figura E.6. Pantalla de estimación del modelo

Fuente: Elaboración Propia.

Con la estimación completada se genera un objeto de nombre “ss1”.

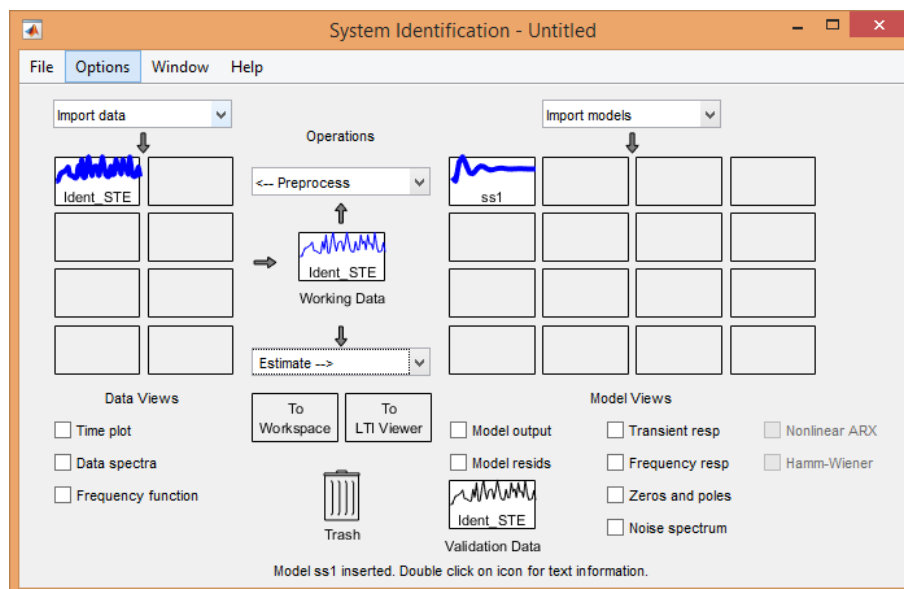


Figura E.7. Modelo estimado en el espacio de estados

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación en la pestaña “estimate” se selecciona “Transfer Function Models”. Que corresponde a un modelo de tercer grado.

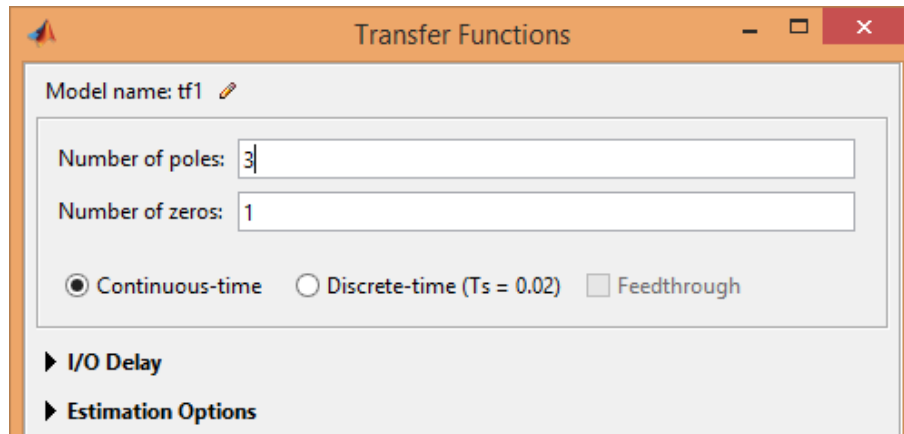


Figura E.8. Pantalla de identificación del espacio de la función de transferencia
Fuente: Elaboración Propia.

El sistema aproxima la función de transferencia del sistema, esto se consigue con 20 iteraciones, la estimación obtenida tiene un 80.23% de ajuste.

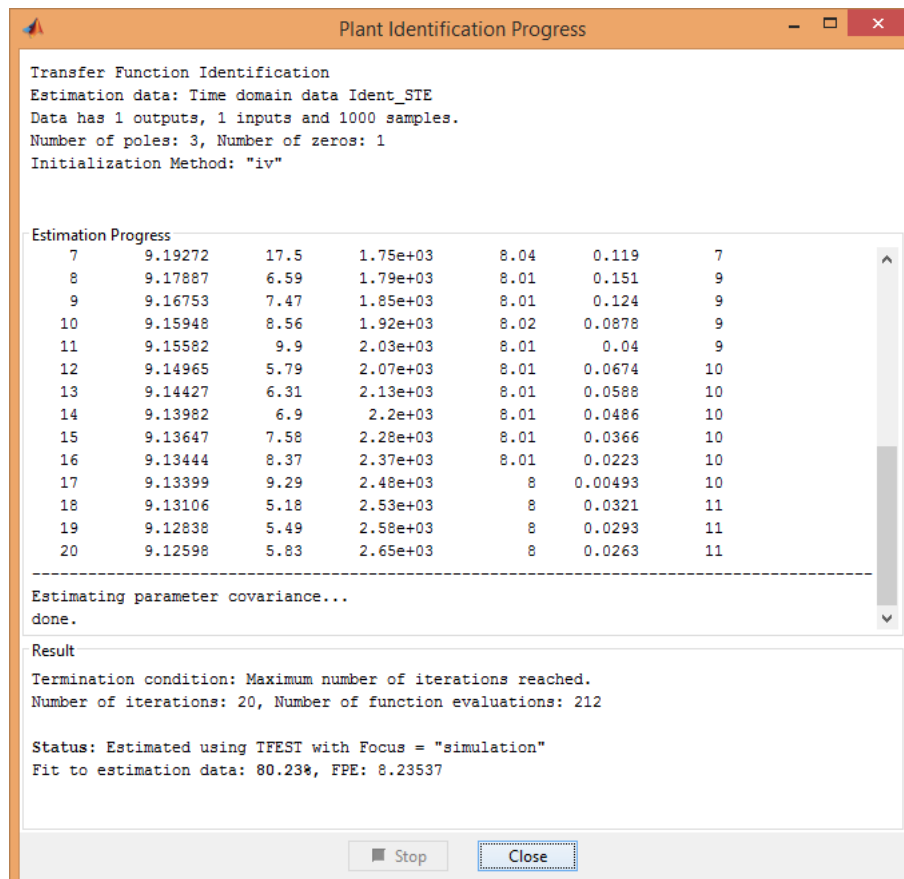


Figura E.9. Pantalla de estimación de la función de transferencia
Fuente: Elaboración Propia.

Con este procedimiento se genera el objeto “tf1”

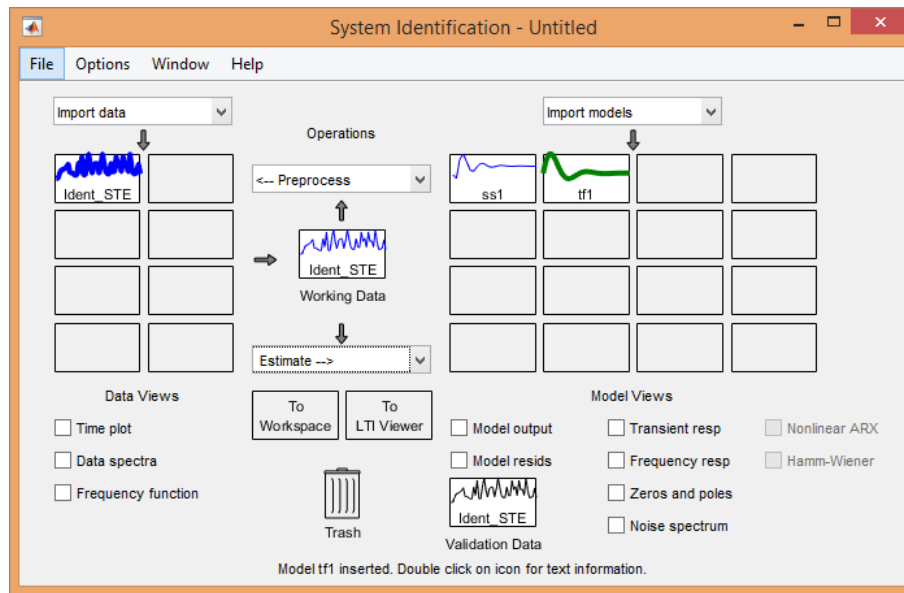


Figura E.10. Modelo estimado de la función de transferencia

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de las matrices de estado identificados son los siguientes.

Para la matriz A:

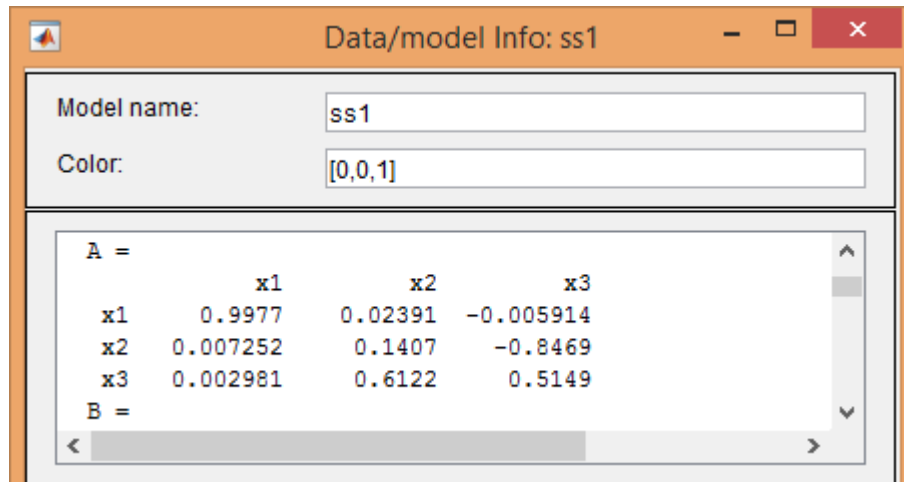


Figura E.11. Matriz de estado “A” identificado

Fuente: Elaboración Propia.

Para la matriz B:

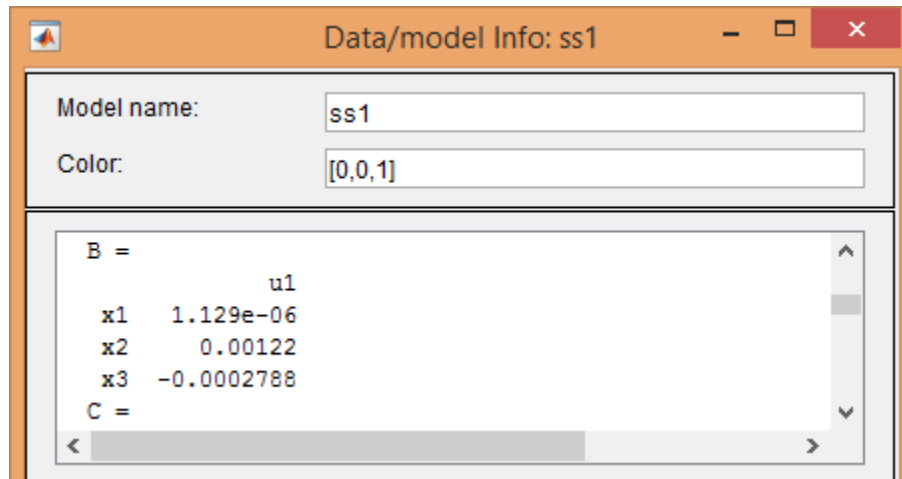


Figura E.12. Matriz de estado "B" identificado

Fuente: Elaboración Propia.

Para la matriz C:

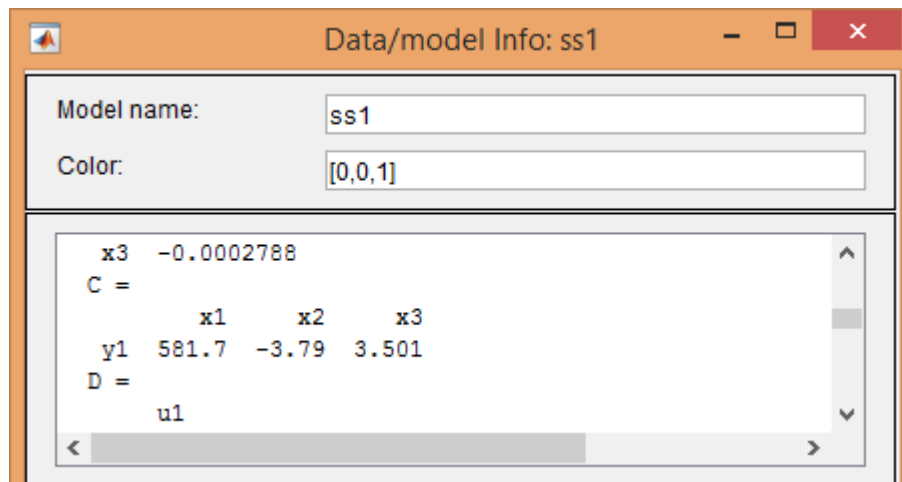


Figura E.13. Matriz de estado "C" identificado

Fuente: Elaboración Propia.

Para la matriz D:

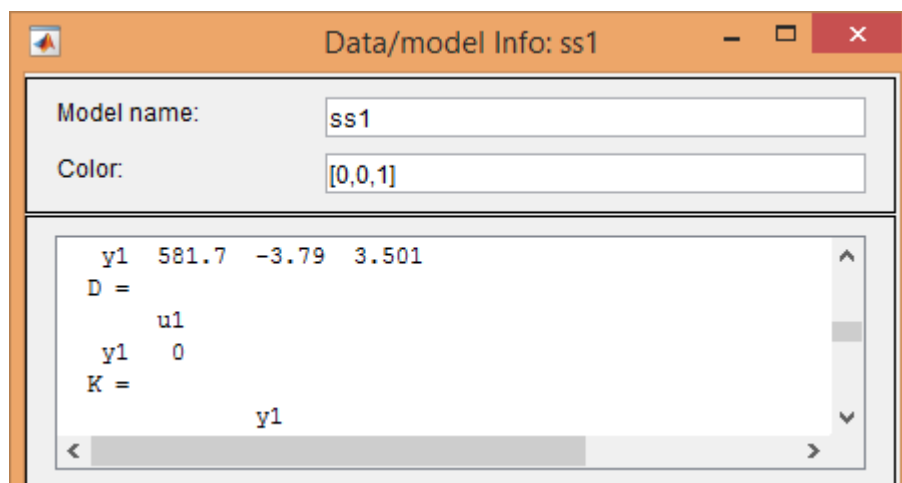


Figura E.14. Matriz de estado "D" identificado

Fuente: Elaboración Propia.

Siendo la función de transferencia identificada:

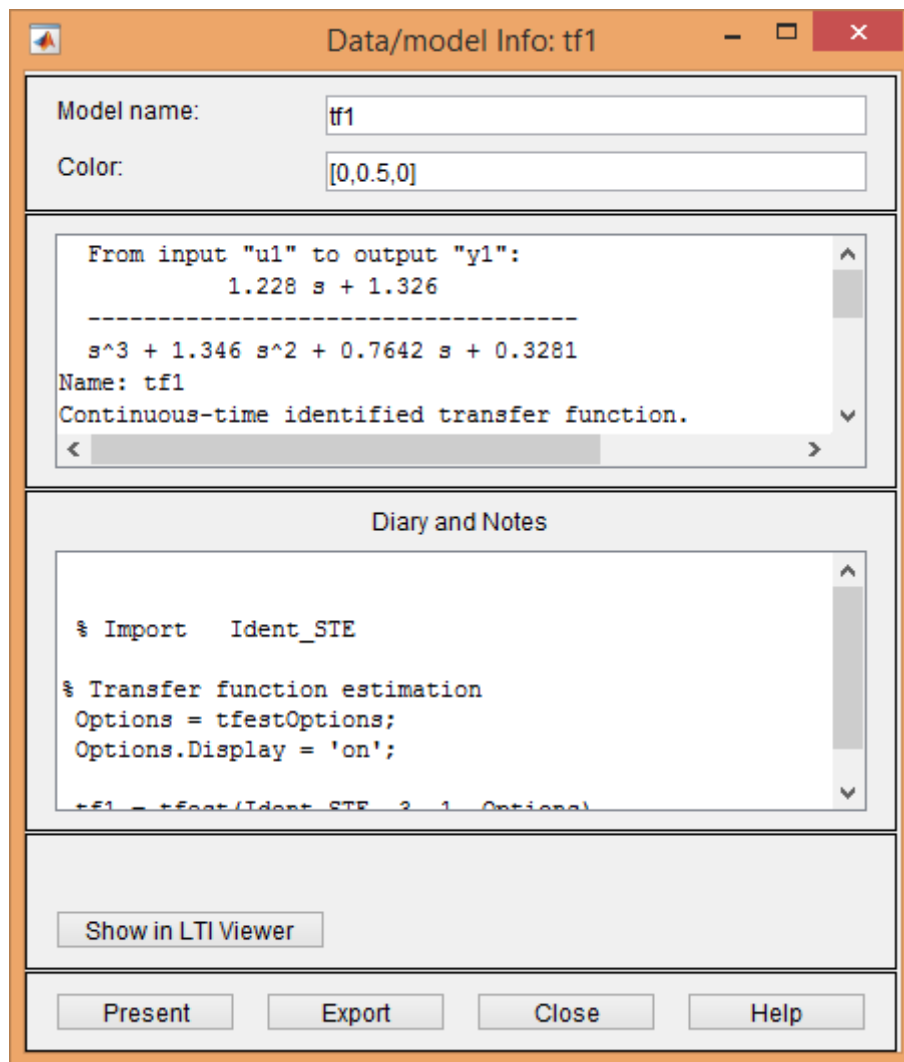


Figura E.15. Función de transferencia identificada

Fuente: Elaboración Propia.

Para la discretización de la función de transferencia identificada se utilizó el siguiente código:

```
num = [1.228 1.326];  
den = [1 1.346 0.7642 0.3281];  
  
G = tf(num,den);  
t = 0.1;  
H = c2d(G, t, 'zoh');  
step(G,H);
```

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

H =

    0.006083 z^2 + 0.0005689 z - 0.005413
-----
    z^3 - 2.867 z^2 + 2.741 z - 0.8741
```

Figura E.16. Resultado de la discretización de la función de transferencia identificada
Fuente: Elaboración Propia.

Anexo F

Diagramas de bloques

Los diagramas de bloques mostrados a continuación corresponden a la planta (sistema tubo – esfera) y a los elementos de control que lo componen.

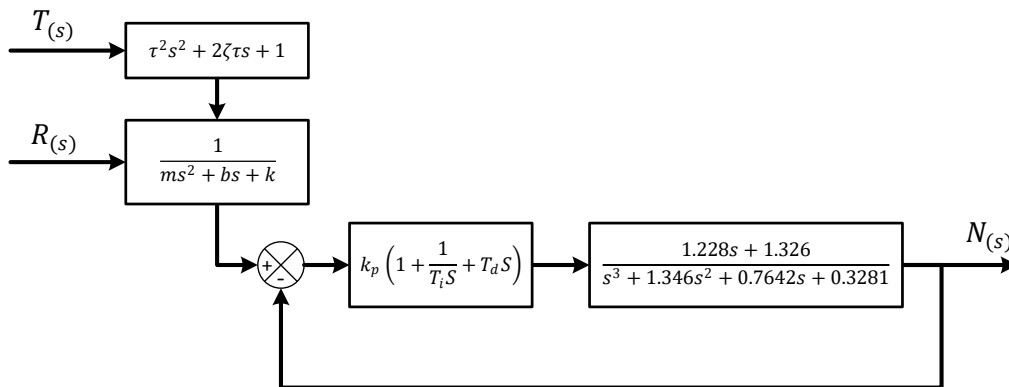


Figura F.1. Diagrama de bloques del sistema completo de levitación neumática

Fuente: Elaboración Propia.

La primera etapa del diagrama consta de dos procesos el primero que corresponde a la función característica del modelo óptimo $\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1$ donde ζ al ser la constante de amortiguamiento nos determina cómo será el comportamiento del sistema y τ al ser el periodo natural, sus soluciones nos permitirán determinar el tiempo de estabilización deseado para el sistema. Las soluciones para el periodo natural dependen del tiempo $T(s)$ que es una referencia de tiempo. Las soluciones de τ determinan como debe ser la respuesta del modelo para alcanzar el punto de consigna que depende de $R(s)$ que es la referencia de nivel.

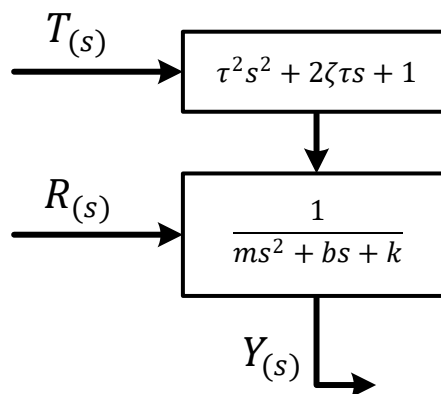


Figura F.2. Diagrama de bloques del modelo óptimo y entradas de referencia

Fuente: Elaboración Propia.

Con el tipo de respuesta calculado el valor de $Y(s)$ determinando la diferencia con el nivel en ese instante $N(s)$ se obtiene el error con el cual el controlador de tipo PID realiza los cálculos de la salida de control $U(s)$ que será aplicado a planta.

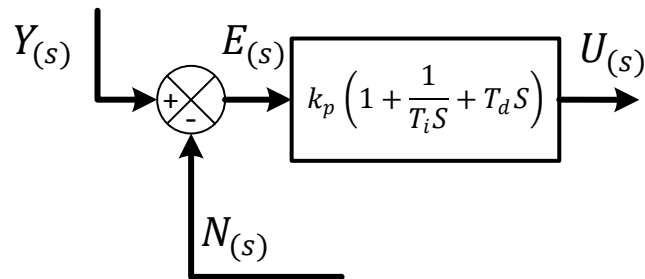


Figura F.3. Diagrama de bloques del control PID

Fuente: Elaboración Propia.

El diagrama de bloques del proceso interno del control PID se expresa de la siguiente manera:

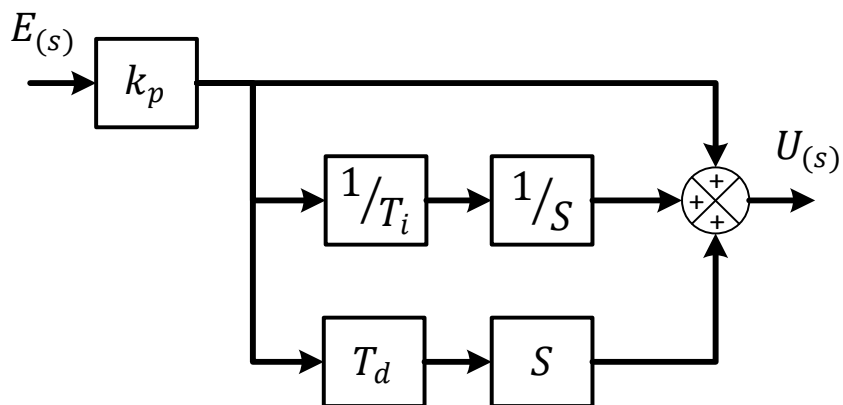


Figura F.4. Diagrama de bloques interno del control PID

Fuente: Elaboración Propia.

El diagrama de bloques de la planta lo compone únicamente la función de transferencia la cual corresponde a la obtenida en el proceso de identificación.

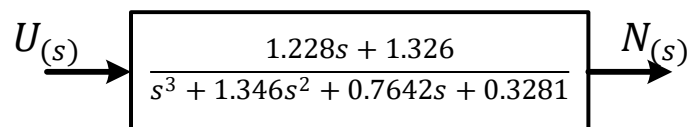


Figura F.5. Función de transferencia de la planta en el diagrama de bloques

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo G

Proceso de implementación

Para comprender el proceso de implementación seccionaremos el código de Arduino sin omitir ninguna línea del algoritmo.

La primera etapa contempla la inclusión de una librería cuya única función es la de facilitar el uso del display LCD16x2 por lo que no influye en nada en el controlador. Seguido de esto se inicializa las variables de control. Las variables más importantes son: C que es ζ (constante de amortiguamiento), t que es τ (periodo natural), además de generar los vectores para el filtro de los potenciómetros.

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 6, 5, 4, 3, 2);

double tiempoActual;
double tiempoAnterior;
double T_ant;
volatile double dT;
volatile double T;
int R = 0;
int R_Ant = 0;
int Var_R = 0;
int trigPin = 7;
int echoPin = 8;
double In_T = 2;
double duracion;
double t;
double t1;
double t2;
double C = 1.43;
float z = 0;
float Kff = 0;
float Kp = 0;
float Ki = 0;
float Kd = 0;
int Ref = 0;
int bias = 225;
double error = 0;
double errorAnt = 0;
double errorSuma = 0;
double errorDer = 0;
double U = 0;
double altura = 0;
double H = 0;
double H_ant = 0;
```



```

float alfa = 0.3;

int referencias[2] = {0,0};

const int lecturas = 10;
float L_kff[lecturas];
int L_kp[lecturas];
int L_ki[lecturas];
int L_kd[lecturas];
int L_ref[lecturas];

int i = 0;
int Total_kp = 0, Promedio_kp = 0;
int Total_ki = 0, Promedio_ki = 0;
int Total_kd = 0, Promedio_kd = 0;
int Total_ref = 0, Promedio_ref = 0;
float Total_kff = 0, Promedio_kff = 0;

int PWM_Actuador = 10;

```

Seguidamente en el bucle void setup se inicia la comunicación, la configuración de los pines y da valor de cero a los elementos de los vectores de lectura de los potenciómetros.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);

  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);
  pinMode(A3, INPUT);
  pinMode(A4, INPUT);
  pinMode(PWM_Actuador, OUTPUT);

  tiempoAnterior = 0;

  for (i = 0; i < lecturas; i++){
    L_kp[i] = 0;
    L_ki[i] = 0;
    L_kd[i] = 0;
    L_kff[i] = 0;
    L_ref[i] = 0;
  }
  i = 0;
}

```

Dentro del bucle principal void loop primero se realiza el filtrado de la lectura de los potenciómetros del HMI, esto lo hacemos con un filtro básico de tipo vectorial.

```
void loop() {

    Total_kp = Total_kp - L_kp[i];
    Total_ki = Total_ki - L_ki[i];
    Total_kd = Total_kd - L_kd[i];
    Total_kff = Total_kff - L_kff[i];
    Total_ref = Total_ref - L_ref[i];

    L_kp[i] = analogRead(A0);
    L_ki[i] = analogRead(A1);
    L_kd[i] = analogRead(A2);
    L_kff[i] = analogRead(A3);
    L_ref[i] = analogRead(A4);

    Total_kp = Total_kp + L_kp[i];
    Total_ki = Total_ki + L_ki[i];
    Total_kd = Total_kd + L_kd[i];
    Total_kff = Total_kff + L_kff[i];
    Total_ref = Total_ref + L_ref[i];

    i = i + 1;

    Promedio_kp = Total_kp / lecturas;
    Promedio_ki = Total_ki / lecturas;
    Promedio_kd = Total_kd / lecturas;
    Promedio_kff = Total_kff / lecturas;
    Promedio_ref = Total_ref / lecturas;

    Kp = 1 - (Promedio_kp*1/1022);
    Ki = 1 - (Promedio_ki*1/1022);
    Kd = 1 - (Promedio_kd*1/1022);
    Kff = 1 - (Promedio_kff*1/1022);
    Ref = map(Promedio_ref, 0, 1022, 60, 0);

    if (i >= lecturas){
        i = 0;
    }
}
```

Seguidamente iniciamos con el proceso de control donde tomamos el tiempo con el comando millis() que devuelve el tiempo transcurrido en milisegundos, por lo que multiplicamos dicho valor por 0.001 para llevarlo a segundos, este tiempo lo almacenamos en una variable "T". Seguidamente determinemos el tiempo discreto o diferencial de tiempo que no es más que la diferencia entre el tiempo actual y el tiempo transcurrido anteriormente.

```
tiempoActual = millis()*0.001;
```

```
T = tiempoActual;
dT = tiempoActual - tiempoAnterior;
```

Si en caso este valor de diferencial de tiempo es mayor a 10 milisegundos se procede a ejecutar la lógica de control.

```
if (dT >= 0.01){
```

Antes de cualquier proceso se debe de comprobar de que no haya transcurrido el periodo de estabilización, en caso se haya alcanzado dicho tiempo, se debe renovar las variables de control. In_T es la entra de tiempo inicial que corresponde a dos segundos, como vimos en el análisis de la solución de debe ingresar el primer step o variación de referencia a los dos segundos.

```
if (T >= In_T + 15*Kff*z){
    referencias[0] = referencias[1];
    referencias[1] = Ref;
    R = referencias[1];
    R_Ant = referencias[0];
    Var_R = R - R_Ant;
    t = Kff;
    z = z + 1;
    T_ant = T;
}
```

Ya sea renovando las variables de control o con las mismas baribales se procede a encontrar las soluciones para el periodo natural del sistema que dependen de Kff representado como el periodo natural "t".

```
t1 = t/(C - sqrt(pow(C,2) - 1));
t2 = t/(C + sqrt(pow(C,2) - 1));
```

Con las soluciones del periodo natural se procede a calcular la respuesta óptima del Sistema con la siguiente expresión, la cual depende del tiempo transcurrido "T" y las soluciones de "t1" y "t2". Eto siguiendo el diseño de control óptimo MPC de tipo tubular.

```
float y = R_Ant + Var_R*(1 + ((t1*exp(-(T-T_ant)/t1) -
t2*exp(-(T-T_ant)/t2))/(t2-t1)));
```

A continuación, se pasa a registrar o tomar la altura actual de la esfera con la siguiente sección de código.

```
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
duracion = pulseIn(echoPin, HIGH);
```

```
double distancia = duracion/58;
double altura    = 60.56 - distancia;
```

El valor de nivel obtenido pasa por el observador que es un filtro EMA que se muestra a continuación.

```
H = alfa*altura + (1-alfa)*H_ant;
```

Antes de la aplicación del primer step se debe de limitar el modelo óptimo debe ser cero.

```
if (T < 2.1){
    y = 0;
}
```

Luego se procede a calcular los términos como: el error, la derivada e integral del error.

```
error      = y - H;
errorDer   = (error - errorAnt)/dT;
errorSuma  = errorSuma + error*dT;
```

Para el termino integral se procede a aplicar la liquidación integral (anti windup), este proceso es muchas veces es omitido generalmente por desconocimiento de su uso, pero su presencia en un correcto desarrollo de un control PID es indispensable.

```
if (errorSuma > 255){
    errorSuma = 255;
}
if (errorSuma < 0){
    errorSuma = 0;
}
```

Con las variables de control determinadas se procede a calcular la salida del controlador.

```
double U = Kp*error + Ki*errorSuma + Kd*errorDer + bias;
```

Antes de la aplicación de la variación de step a los dos segundos se aplica únicamente el factor correctivo (bias).

```
if (T <= In_T){
    U = bias;
}
```

Cuando ya transcurrieron los dos segundos iniciales solo queda limitar la salida del controlador, debido a que la salida del Arduino es de 8 bits, se tiene como límite un valor de 255.

```
else{
  if (U > 255){
    U = 255;
  }
  if (U < 0){
    U = 0;
  }
}
```

Después de esto se procede a mostrar las variables en el HMI y en caso de comunicar el Arduino con una PC se procede a enviar la información.

```
Serial.print(R);
Serial.print('\t');
Serial.print(y);
Serial.print('\t');
Serial.println(H);

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("R=");
lcd.setCursor(2, 0);
lcd.print(R);
lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print("cm");
lcd.setCursor(8, 0);
lcd.print("Y= ");
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print((int)y);
lcd.setCursor(12, 0);
lcd.print("cm");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("T=");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print((int)T);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print("s");
lcd.setCursor(8, 1);
lcd.print("H=");
lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print((int)altura);
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print("cm");
```

Al final de todo el proceso es donde se aplica la salida de control, además de renovar y almacenar las variables requeridas de control.

```
    analogWrite(PWM_Actuador, floor(U));  
    errorAnt = error;  
    H_ant = H;  
    tiempoAnterior = tiempoActual;  
  }  
}
```

Anexo H

Errores de pruebas mostradas

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.1$ es:

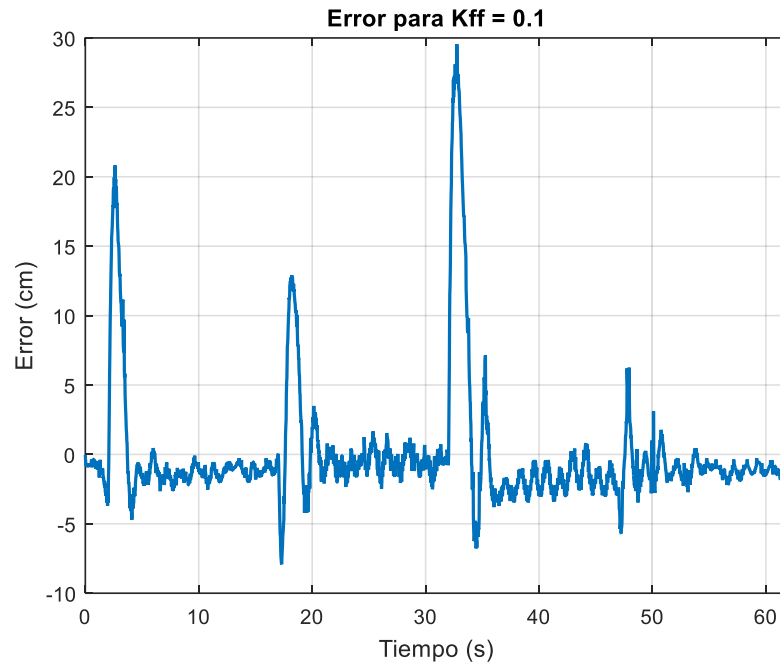


Figura H.1. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.1$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.2$ es:

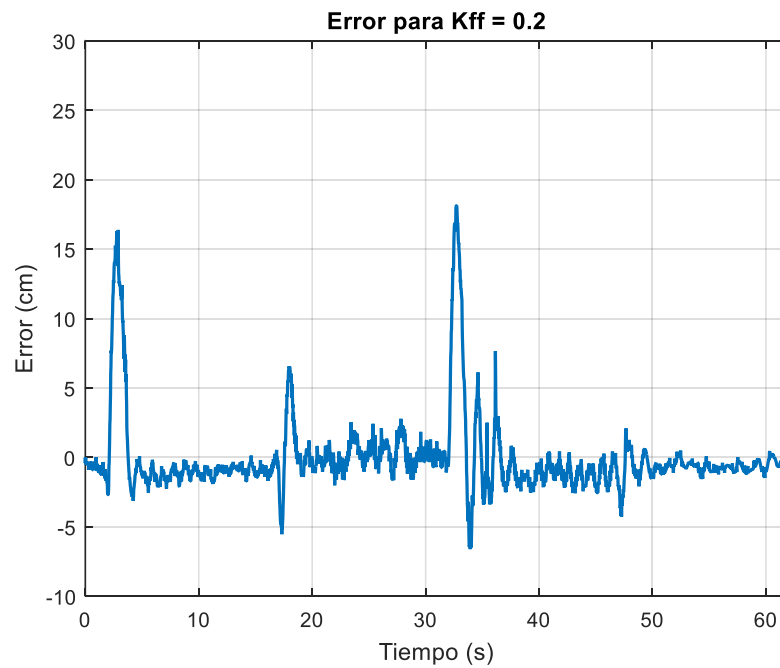


Figura H.2. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.2$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.3$ es:

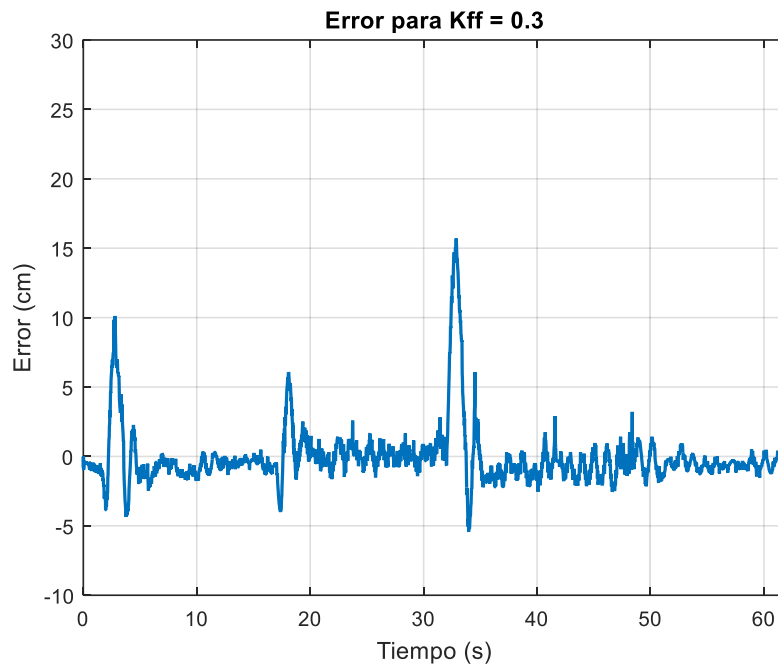


Figura H.3. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.3$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.4$ es:

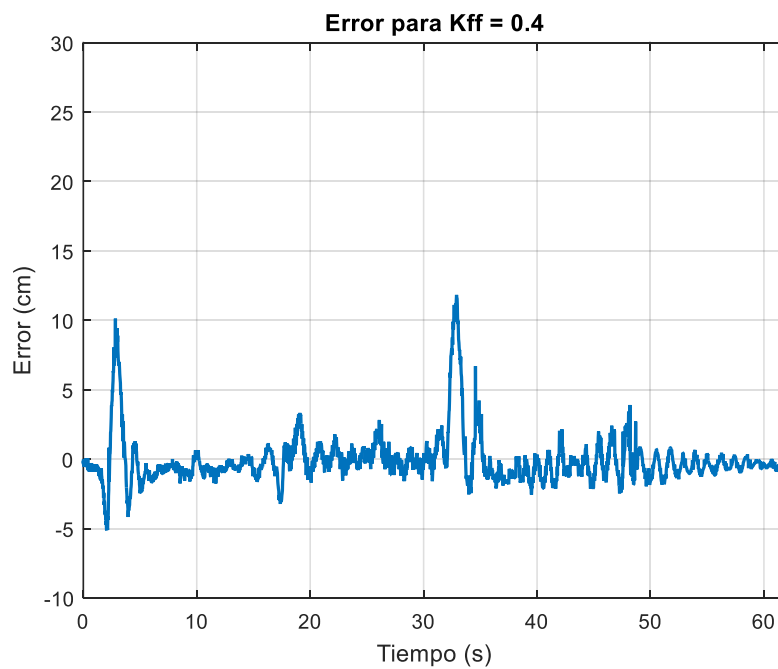


Figura H.4. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.4$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.5$ es:

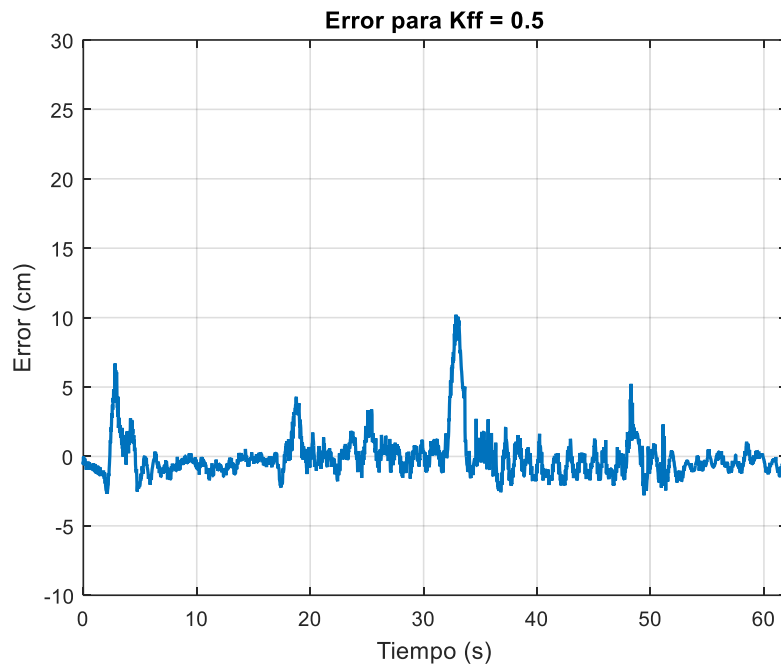


Figura H.5. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.5$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.6$ es:

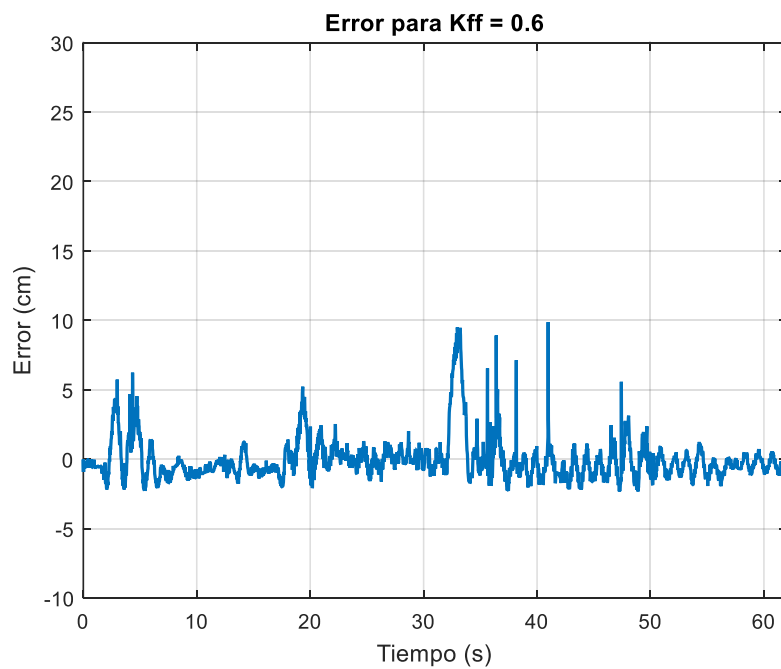


Figura H.6. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.6$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.7$ es:

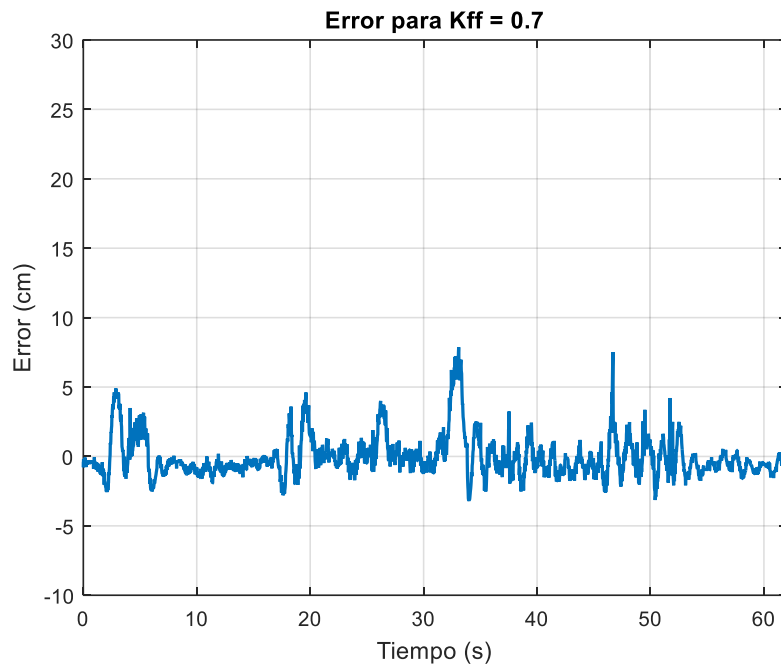


Figura H.7. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.7$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.8$ es:

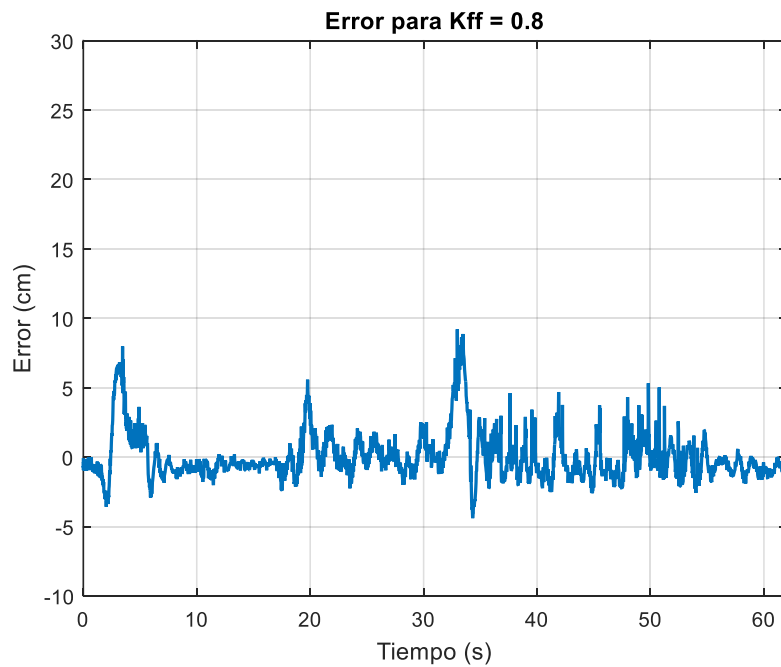


Figura H.8. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.8$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 0.9$ es:

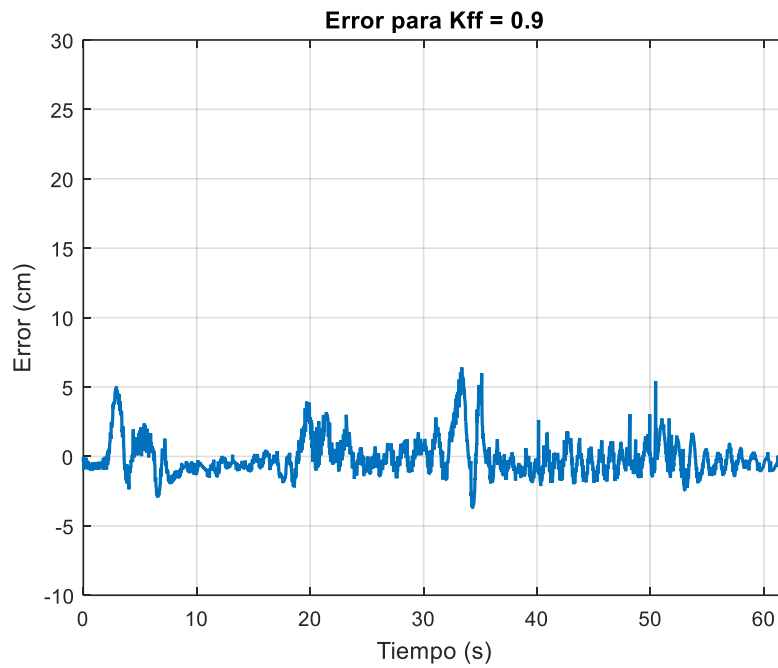


Figura H.9. Error en la prueba para $K_{ff} = 0.9$

Fuente: Elaboración propia.

El error en el tiempo de la prueba para $K_{ff} = 1$ es:

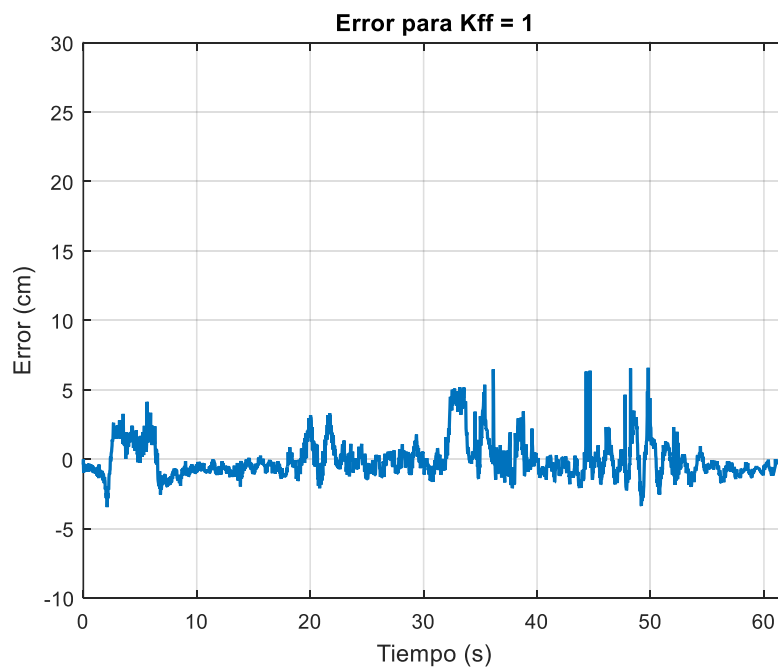


Figura H .10. Error en la prueba para $K_{ff} = 1$

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas correctivas

El diagrama de bode del sistema identificado permite confirmar la inestabilidad del sistema.

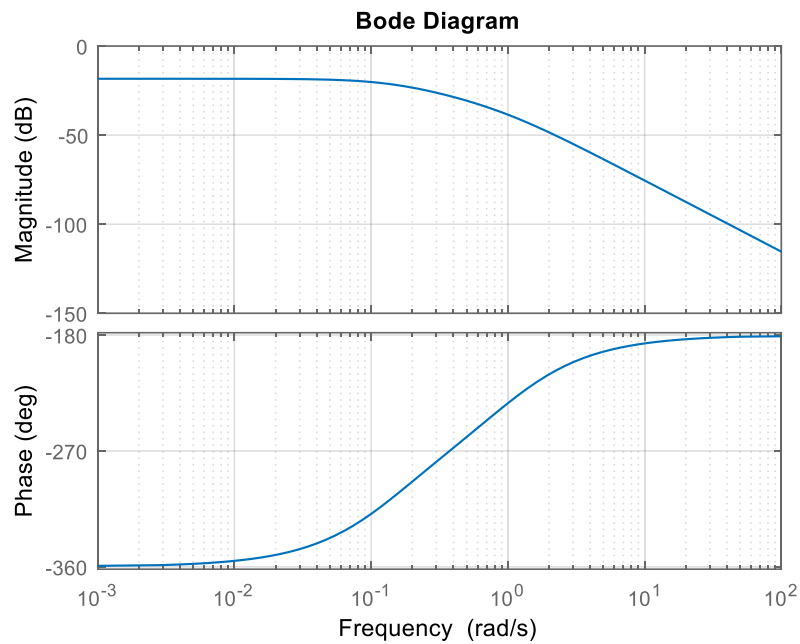


Figura H.11. Diagrama de bode del sistema tubo – esfera

Fuente: Elaboración Propia.

Con la implementación de control presenta estabilidad en su respuesta.

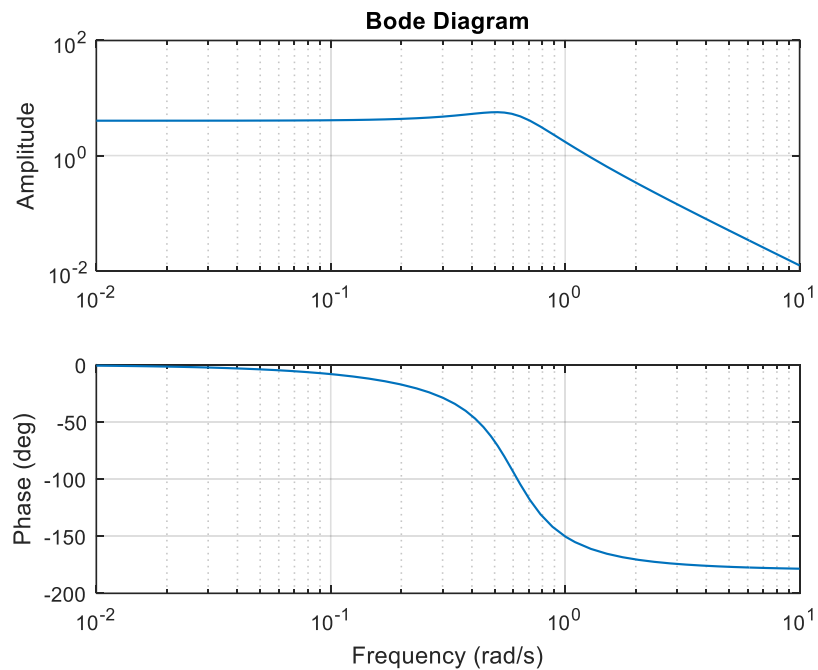


Figura H.12. Diagrama de bode del sistema con controlador

Fuente: Elaboración Propia.

La incorporación de un factor correctivo (*bias*) permite una mejora en la respuesta.

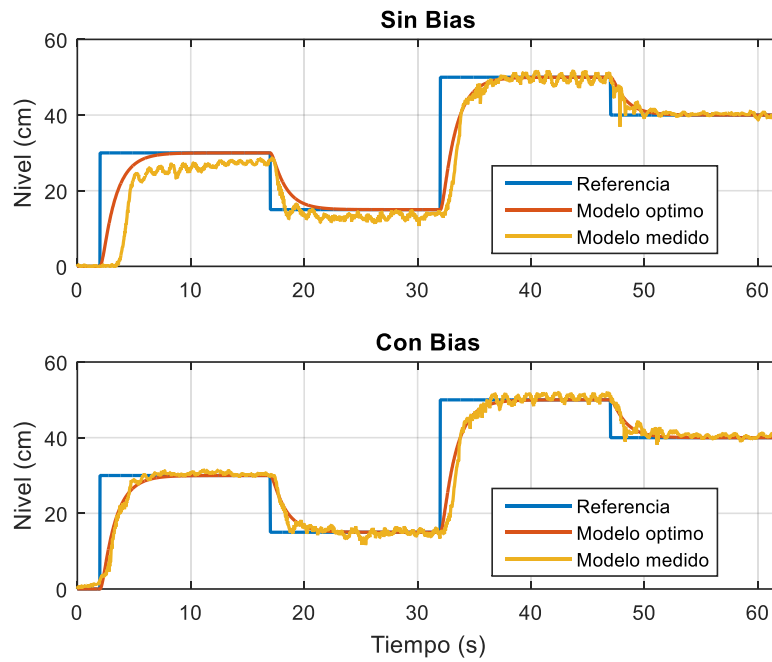


Figura H.13. Comparación de la respuesta con el factor correctivo

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas para constantes de acción $K_p = 30$, $K_i = 12$ y $K_d = 5$

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.1$

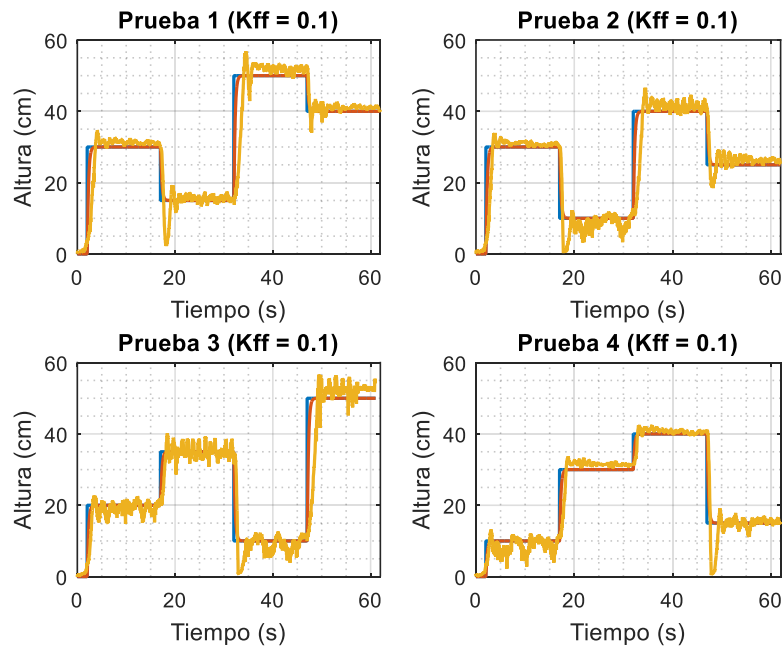


Figura H.14. Pruebas para $K_{ff} = 0.1$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.2$

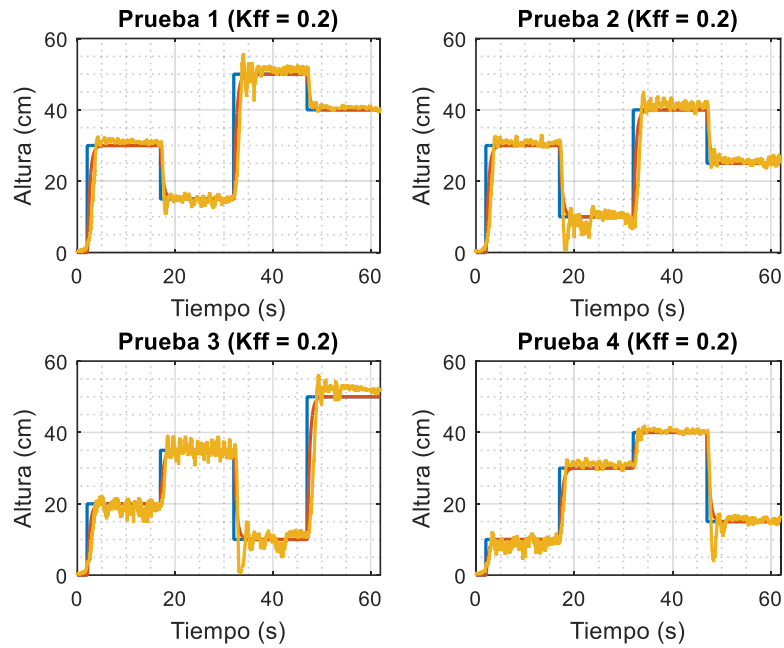


Figura H.15. Pruebas para $K_{ff} = 0.3$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.3$

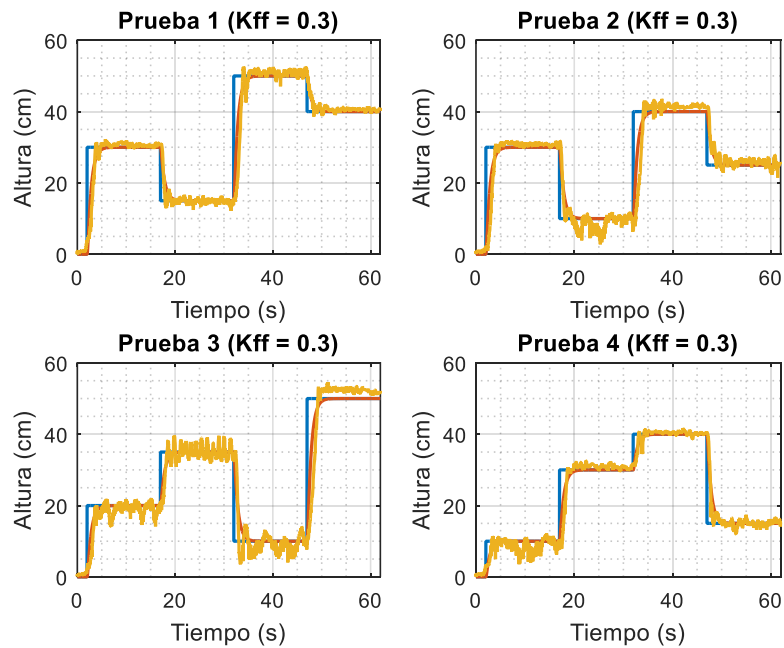


Figura H.16. Pruebas para $K_{ff} = 0.3$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.4$

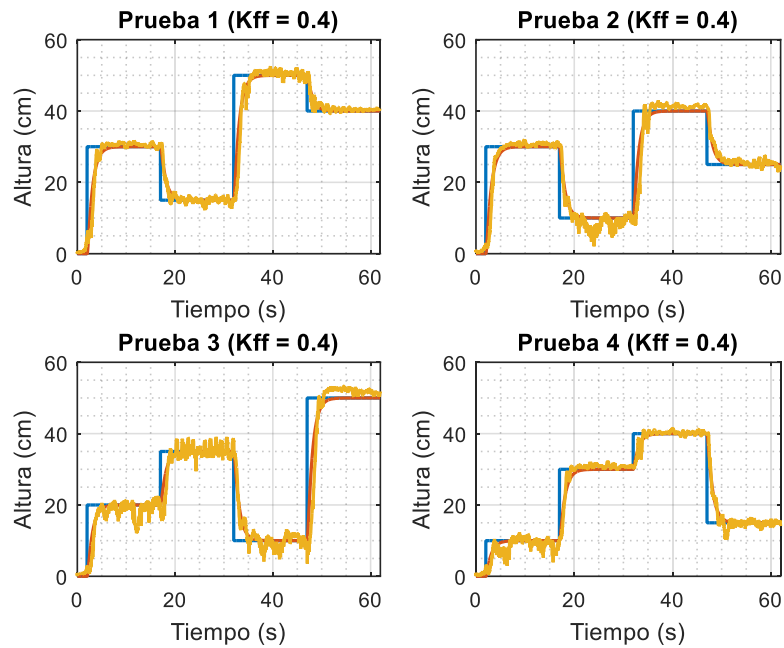


Figura H.17. Pruebas para $K_{ff} = 0.4$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.5$

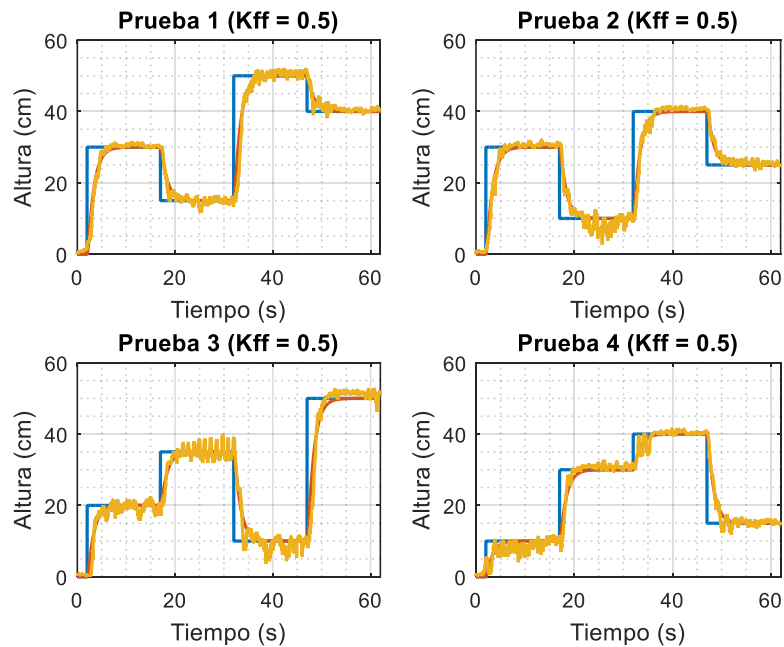


Figura H.18. Pruebas para $K_{ff} = 0.5$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas realizadas completas realizadas para $K_{ff} = 0.6$

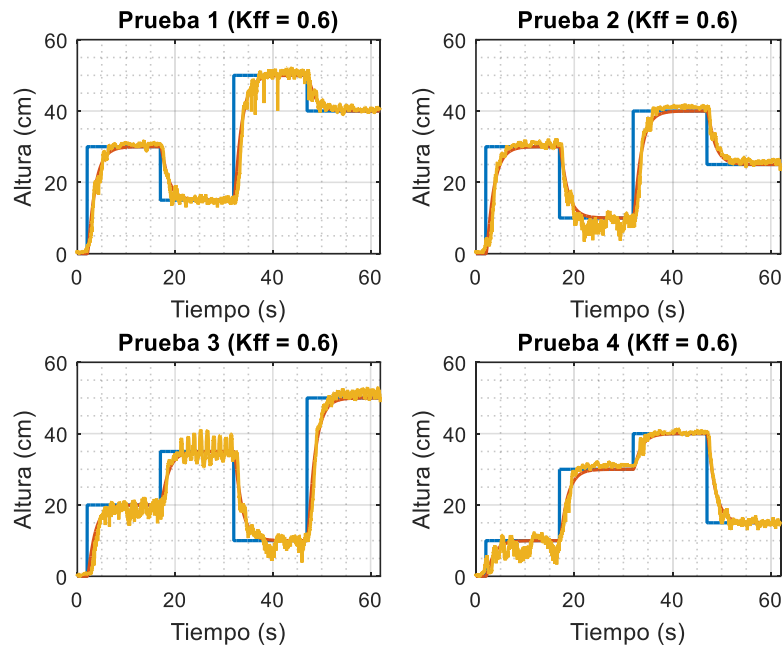


Figura H.19. Pruebas para $K_{ff} = 0.6$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.7$

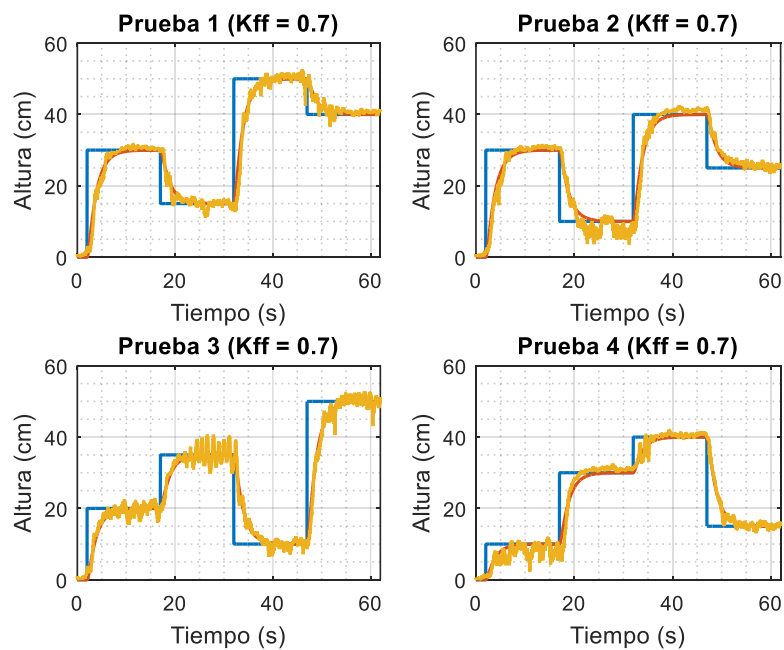


Figura H.20. Pruebas para $K_{ff} = 0.7$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.8$

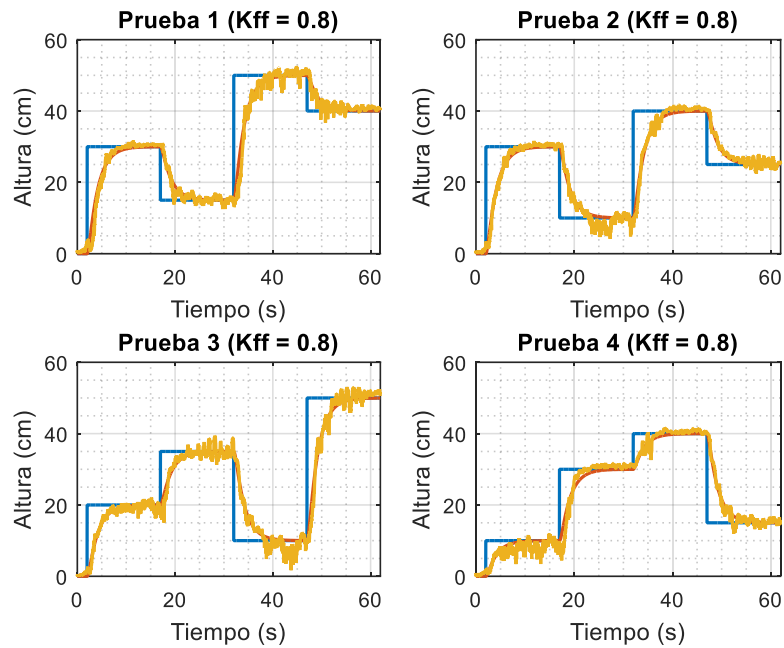


Figura H.21. Pruebas para $K_{ff} = 0.8$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.9$

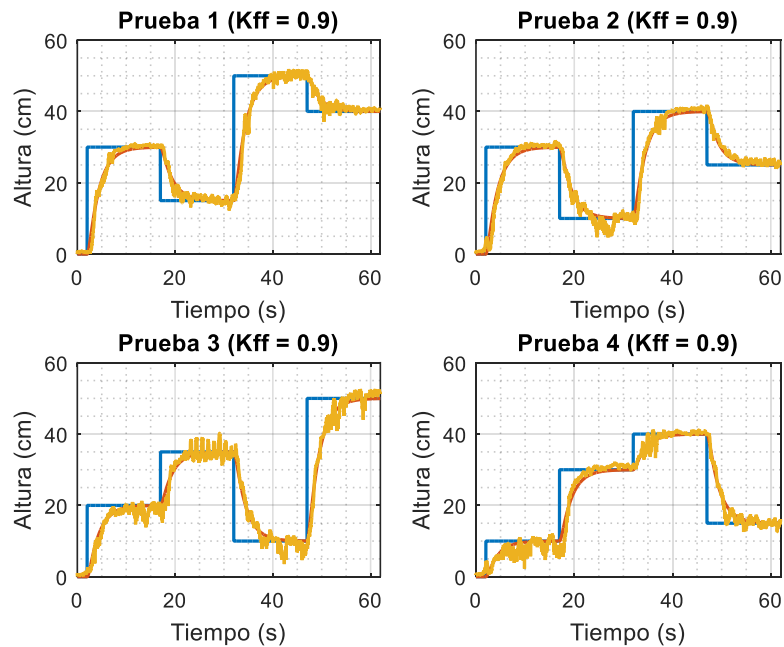


Figura H.22. Pruebas para $K_{ff} = 0.9$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 1$

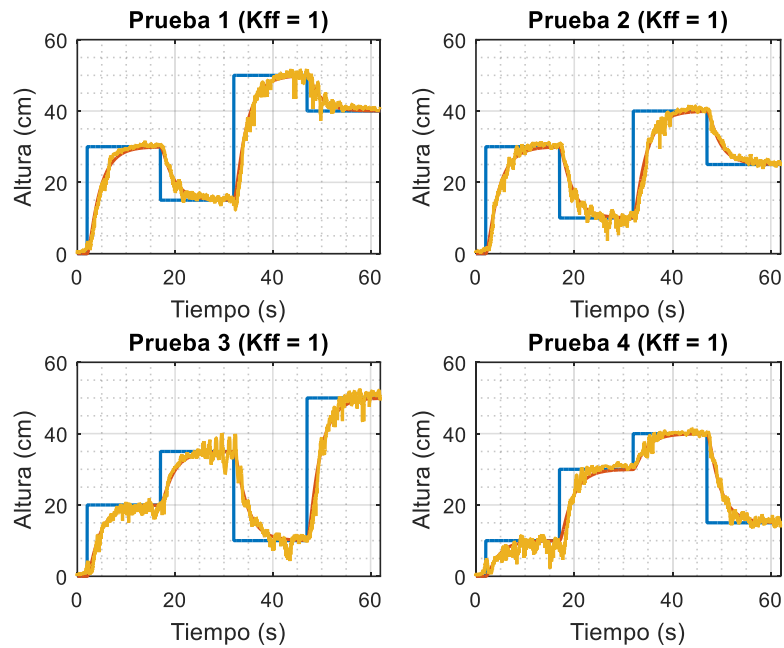


Figura H.23. Pruebas para $K_{ff} = 1$ con la primera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas para constantes de acción $K_p = 20$, $K_i = 20$ y $K_d = 10$

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.3$

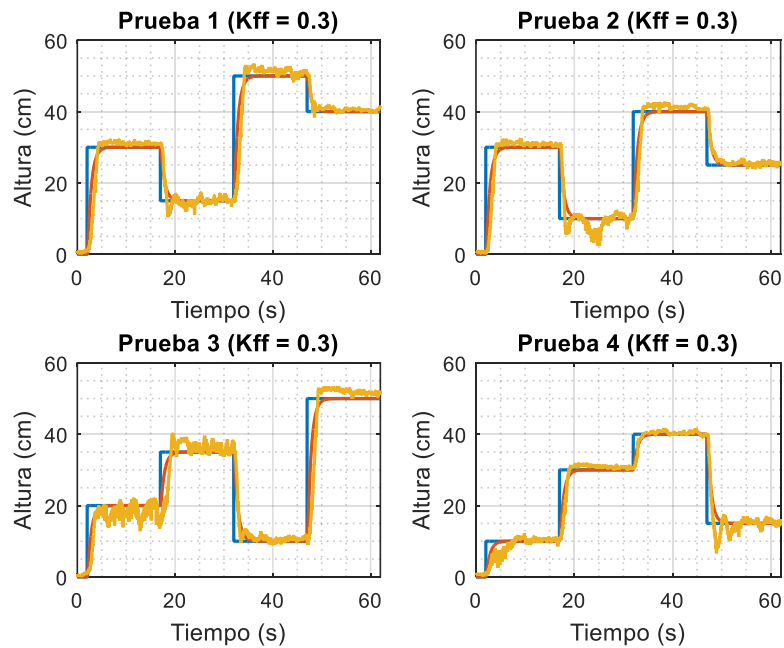


Figura H.24. Pruebas para $K_{ff} = 0.3$ con la segunda configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.7$

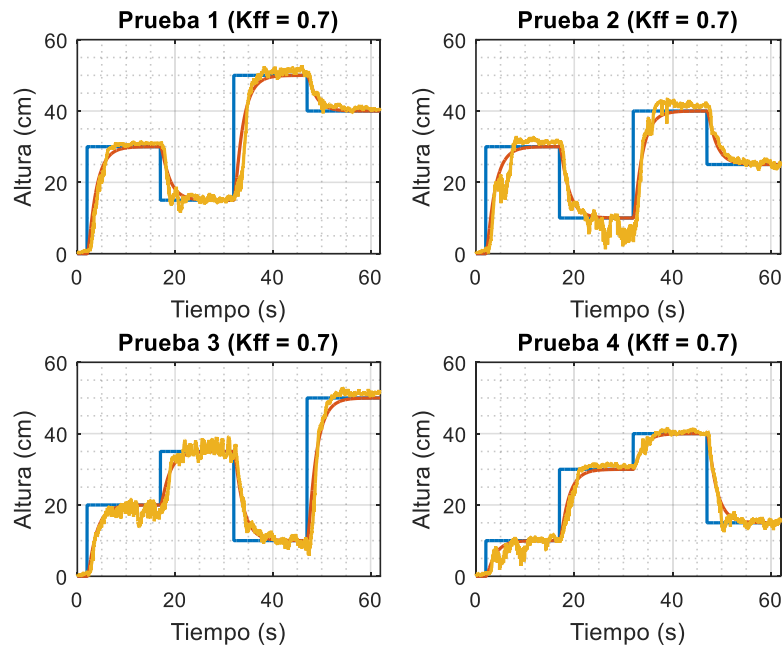


Figura H.25. Pruebas para $K_{ff} = 0.7$ con la segunda configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 1$

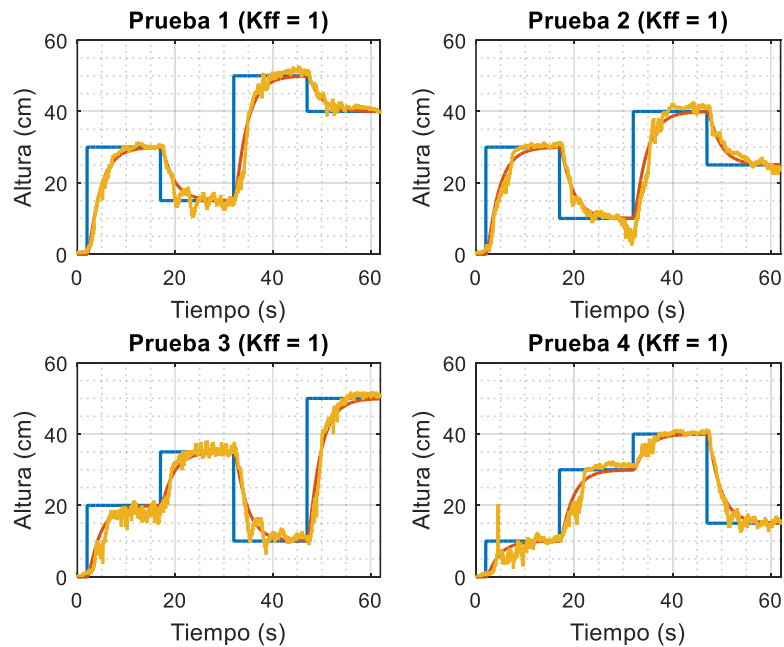


Figura H.26. Pruebas para $K_{ff} = 1$ con la segunda configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas para constantes de acción $K_p = 45$, $K_i = 48$ y $K_d = 10$

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.3$

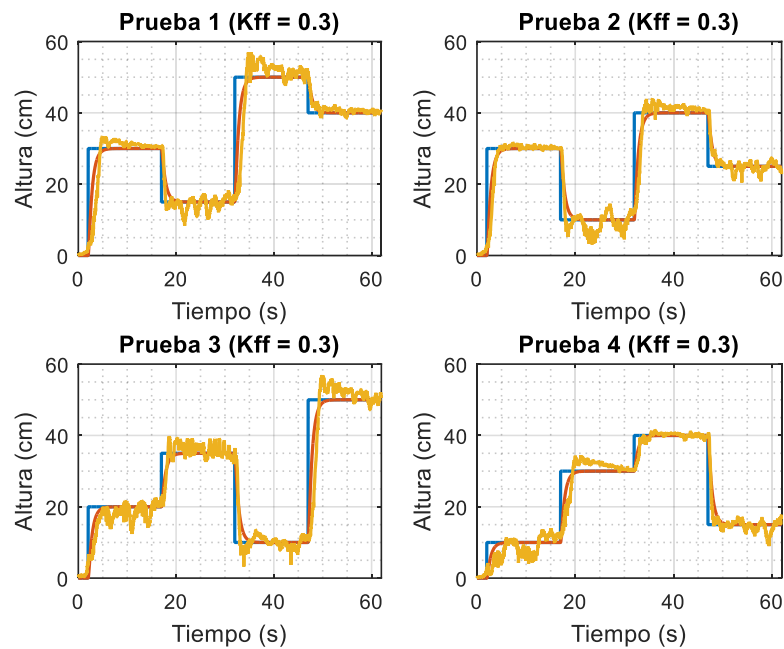


Figura H.27. Pruebas para $K_{ff} = 0.3$ con la tercera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.6$

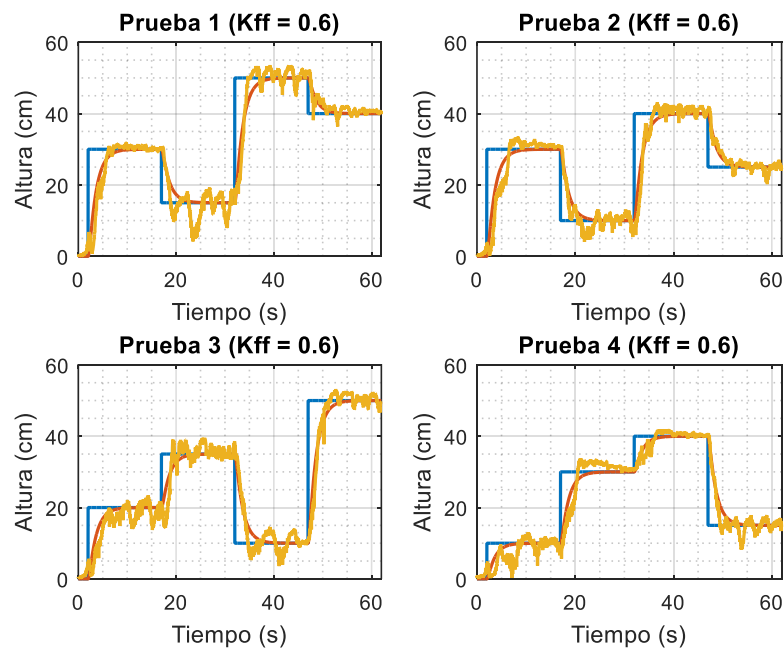


Figura H.28. Pruebas para $K_{ff} = 0.6$ con la tercera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Pruebas completas realizadas para $K_{ff} = 0.9$

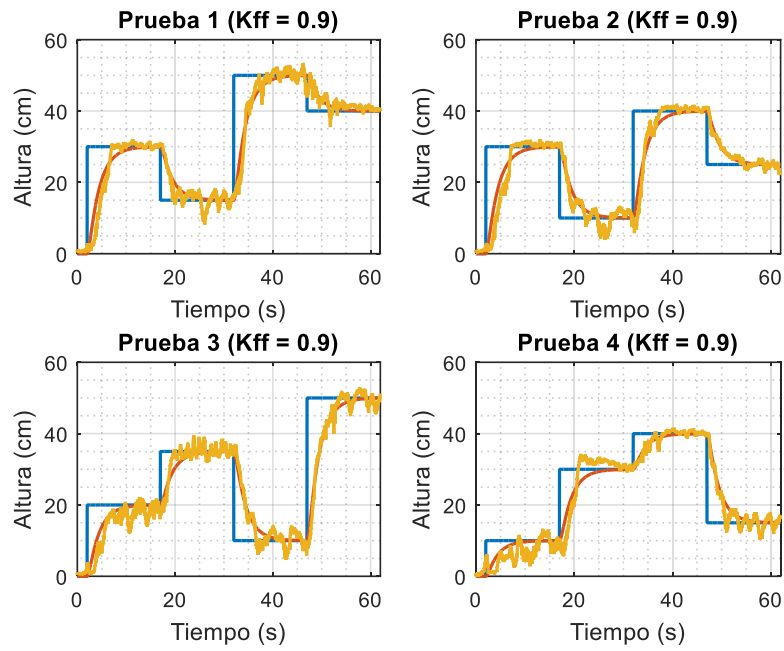


Figura H.29. Pruebas para $K_{ff} = 0.9$ con la tercera configuración del PID

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo I

Hoja de datos

Datasheet del Arduino NANO V3



element14

EN - For pricing and availability in your local country please visit one of the below links:

DE - Informationen zu Preisen und Verfügbarkeit in Ihrem Land erhalten Sie über die unten aufgeführten Links:

FR - Pour connaître les tarifs et la disponibilité dans votre pays, cliquez sur l'un des liens suivants:

[A000005](#)

EN
This Datasheet is presented by
the manufacturer

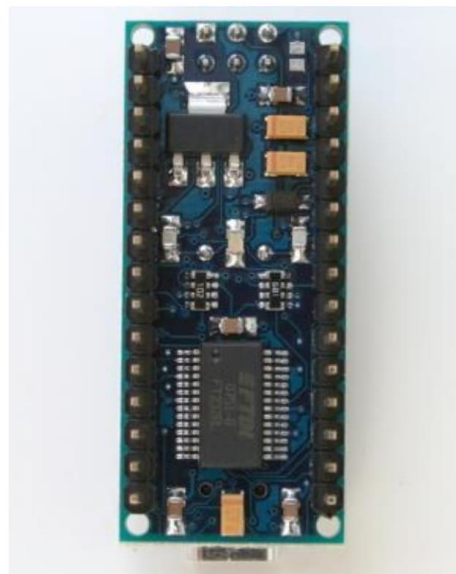
DE
Dieses Datenblatt wird vom
Hersteller bereitgestellt

FR
Cette fiche technique est
présentée par le fabricant

Arduino Nano



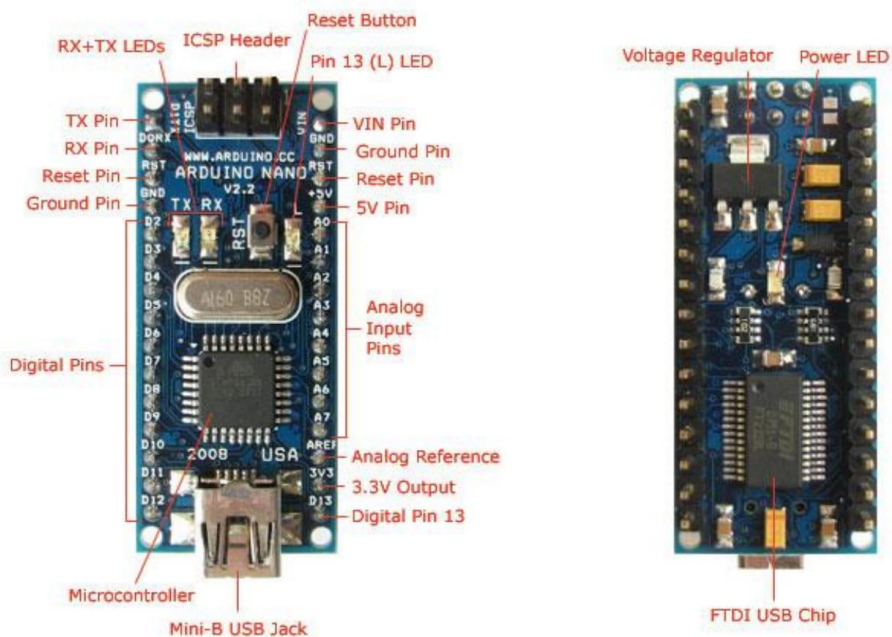
Arduino Nano Front



Arduino Nano Rear

Overview

The Arduino Nano is a small, complete, and breadboard-friendly board based on the ATmega328 (Arduino Nano 3.0) or ATmega168 (Arduino Nano 2.x). It has more or less the same functionality of the Arduino Duemilanove, but in a different package. It lacks only a DC power jack, and works with a Mini-B USB cable instead of a standard one. The Nano was designed and is being produced by Gravitech.



Schematic and Design

Arduino Nano 3.0 (ATmega328): [schematic](#), [Eagle files](#).

Arduino Nano 2.3 (ATmega168): [manual](#) (pdf), [Eagle files](#). *Note:* since the free version of Eagle does not handle more than 2 layers, and this version of the Nano is 4 layers, it is published here unrouted, so users can open and use it in the free version of Eagle.

Specifications:

Microcontroller	Atmel ATmega168 or ATmega328
Operating Voltage (logic level)	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader
SRAM	1 KB (ATmega168) or 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 bytes (ATmega168) or 1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Dimensions	0.73" x 1.70"

Power:

The Arduino Nano can be powered via the Mini-B USB connection, 6-20V unregulated external power supply (pin 30), or 5V regulated external power supply (pin 27). The power source is automatically selected to the highest voltage source.

The FTDI FT232RL chip on the Nano is only powered if the board is being powered over USB. As a result, when running on external (non-USB) power, the 3.3V output (which is supplied by the FTDI chip) is not available and the RX and TX LEDs will flicker if digital pins 0 or 1 are high.

Memory

The ATmega168 has 16 KB of flash memory for storing code (of which 2 KB is used for the bootloader); the ATmega328 has 32 KB, (also with 2 KB used for the bootloader). The ATmega168 has 1 KB of SRAM and 512 bytes of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)); the ATmega328 has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM.

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Nano can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- + **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the FTDI USB-to-TTL Serial chip.
- + **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- + **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- + **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication, which, although provided by the underlying hardware, is not currently included in the Arduino language.
- + **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Nano has 8 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

I²C: 4 (SDA) and 5 (SCL). Support I²C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website).

There are a couple of other pins on the board:

AREF. Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).

Reset. Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and ATmega168 ports](#).

Communication

The Arduino Nano has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega168 and ATmega328 provide UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An FTDI FT232RL on the board channels this serial communication over USB and the [FTDI drivers](#) (included with the Arduino software) provide a virtual com port to software on the computer. The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the FTDI chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Nano's digital pins.

The ATmega168 and ATmega328 also support I²C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a [Wire library](#) to simplify use of the I²C bus; see the [documentation](#) for details. To use the SPI communication, please see the ATmega168 or ATmega328 datasheet.

Programming

The Arduino Nano can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Diecimila, Duemilanove, or Nano w/ ATmega168" or "Arduino Duemilanove or Nano w/ ATmega328" from the **Tools**

> **Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega168 or ATmega328 on the Arduino Nano comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Nano is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the FT232RL is connected to the reset line of the ATmega168 or ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload.

This setup has other implications. When the Nano is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Nano. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.



element14

EN - For pricing and availability in your local country please visit one of the below links:

DE - Informationen zu Preisen und Verfügbarkeit in Ihrem Land erhalten Sie über die unten aufgeführten Links:

FR - Pour connaître les tarifs et la disponibilité dans votre pays, cliquez sur l'un des liens suivants:

[A000005](#)

EN
This Datasheet is presented by
the manufacturer

DE
Dieses Datenblatt wird vom
Hersteller bereitgestellt

FR
Cette fiche technique est
présentée par le fabricant

HC-SR04 User Guide

1. Ultrasonic Distance Measurement Principles

The transmitter emits a 8 bursts of an directional 40KHz ultrasonic wave when triggered and starts a timer. Ultrasonic pulses travel outward until they encounter an object, The object causes the the wave to be reflected back towards the unit. The ultrasonic receiver would detect the reflected wave and stop the stop timer. The velocity of the ultrasonic burst is 340m/sec. in air. Based on the number of counts by the timer, the distance can be calculated between the object and transmitter The TRD Measurement formula is expressed as: $D = C \times T$ which is know as the time/rate/distance measurement formula where D is the measured distance, and R is the propagation velocity (Rate) in air (speed of sound) and T represents time. In this application T is devided by 2 as T is double the time value from transmitter to object back to receiver.

2. Product Features

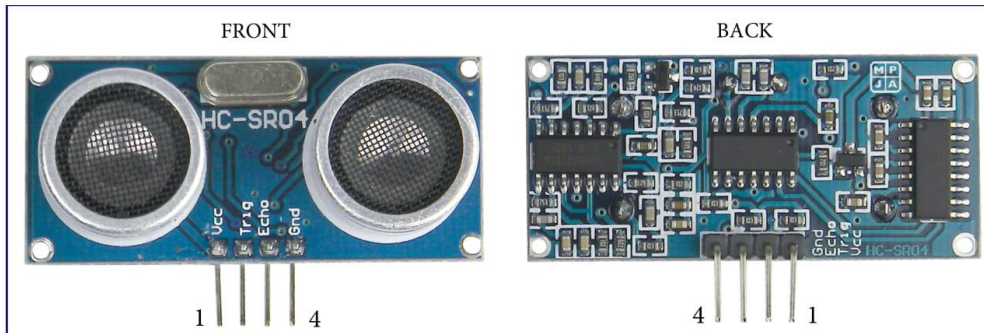
Features

- Stable performance (Xtal.)
- Accurate distance measurement
- High-density SMD Board
- Close Range (2cm)

Uses

- Robotics barrier
- Object distance measurement
- Level detection
- Security systems
- Vehicle detection/avoidance

3. Product Views



4. Module Pin Assignments

	Pin Symbol	Pin Function Description
1	VCC	5V power supply
2	Trig	Trigger Input pin
3	Echo	Receiver Output pin
4	GND	Power ground

5. Electrical Specifications

WARNING

Do Not connect Module with Power Applied! Always apply power after connecting
Connect "GND" Terminal first

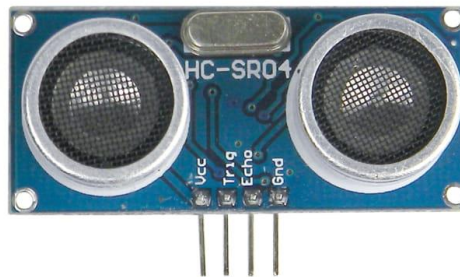
Electrical Parameters	HC-SR04 Ultrasonic Module
Operating Voltage	5VDC
Operating Current	15mA
Operating Frequency	40KHz
Max. Range	4m
Nearest Range	2cm
Measuring Angle	15 Degrees
Input Trigger Signal	10us min. TTL pulse
Output Echo Signal	TTL level signal, proportional to distance
Board Dimensions	1-13/16" X 13/16" X 5/8"
Board Connections	4 X 0.1" Pitch Right Angle Header Pins

6. Module Operation

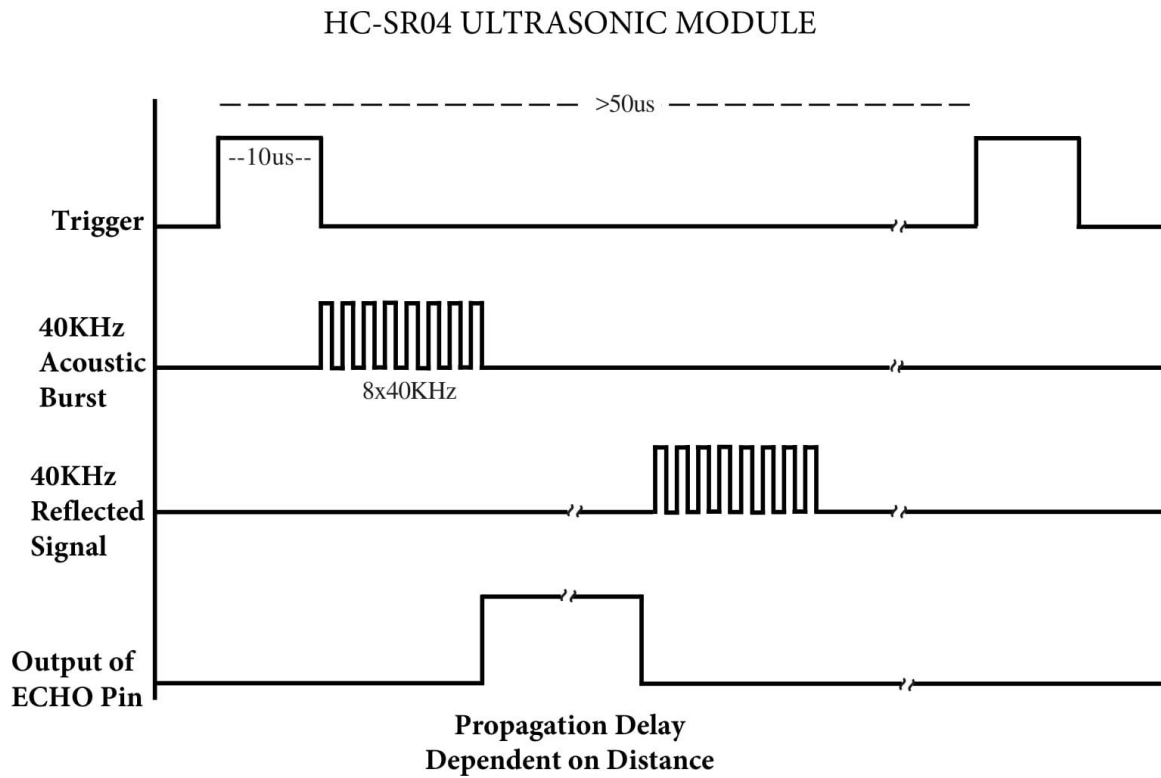
Set Trig and Echo Low to initialize module. Place a minimum 10us High level pulse to "Trigger" (module will automatically send eight 40KHz acoustic bursts). At the same time, Gate the microcontroller timer to start timing.

Wait to capture the rising edge output of ECHO port to stop the timer. Now read the time of the counter, which is the ultrasonic propagation time in the air. According to the formula: Distance = (ECHO high level time X ultrasonic velocity (Speed of Sound in air 340m/sec) / 2, you can calculate the distance to the obstacle.

For best results and maximum range, the Object should be larger than 0.5M² the nearer the target object, the smaller it may be



7. Module Timing



Trigger 10µs min. start measurement from microcontroller.

Max Rep. Rate: 50µs

ECHO Output pulse to microcontroller, width is the time from last of 8 40KHz bursts to detected reflected signal (microcontroller Timer gate signal)

Distance in cm = echo pulse width in µs/58

Distance in inch = echo pulse width in µs/148

Information obtained from or supplied by Mpja.com or Marlin P. Jones and Associates inc. is supplied as a service to our customers and accuracy is not guaranteed nor is it definitive of any particular part or manufacturer. Use of information and suitability for any application is at users own discretion and user assumes all risk.

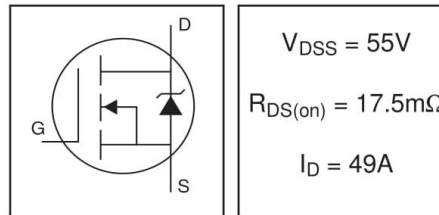


PD - 94053

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

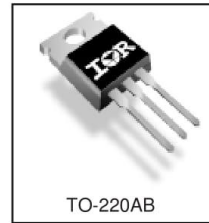
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	49	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
P_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	


Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	


IRFZ44N

International
IR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	m Ω	$V_{DS} = 10V, I_D = 25A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—		$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530 ⑤	150 ⑥		mJ

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)

③ $I_{SD} \leq 25A, di/dt \leq 230A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$

④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

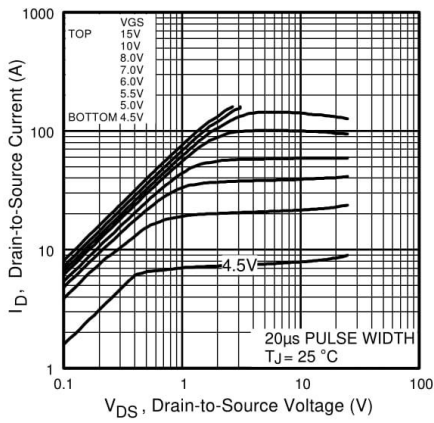


Fig 1. Typical Output Characteristics

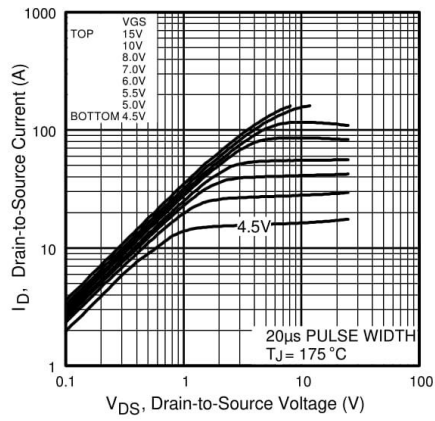


Fig 2. Typical Output Characteristics

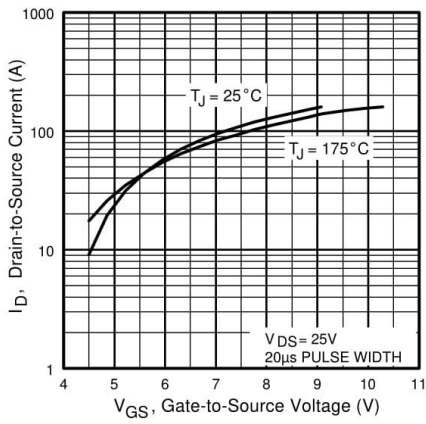


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

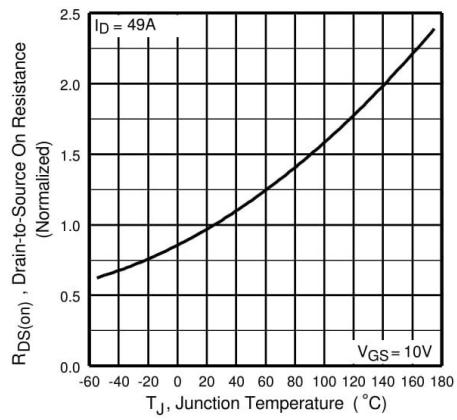


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFZ44N

International
IR Rectifier

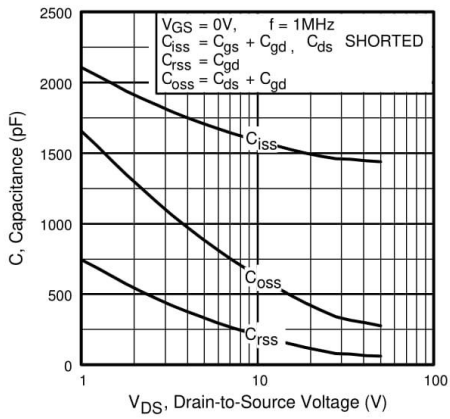


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

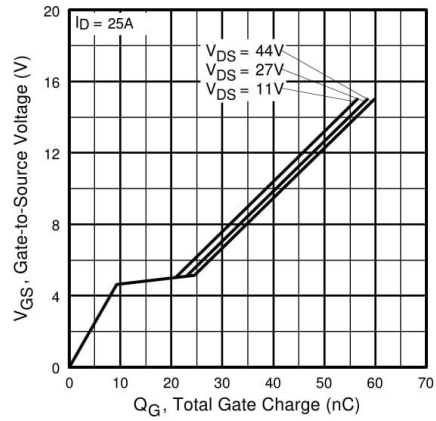


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

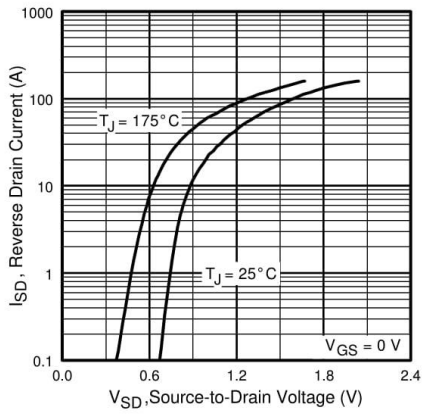


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

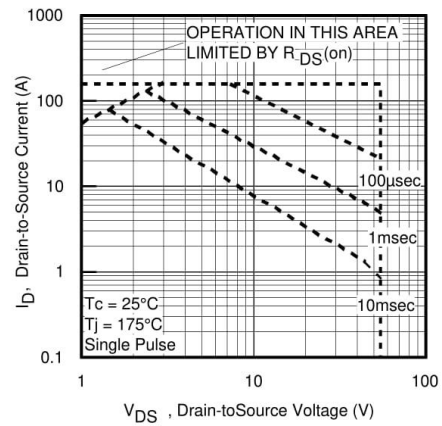


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

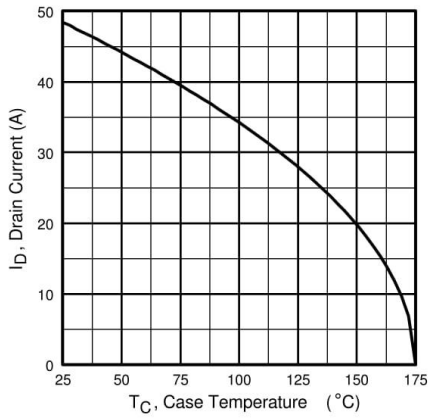


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

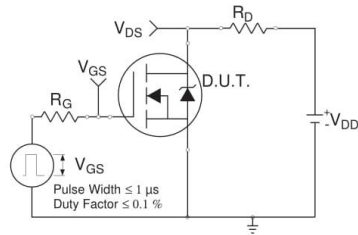


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

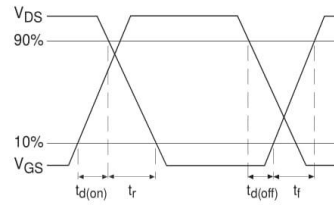


Fig 10b. Switching Time Waveforms

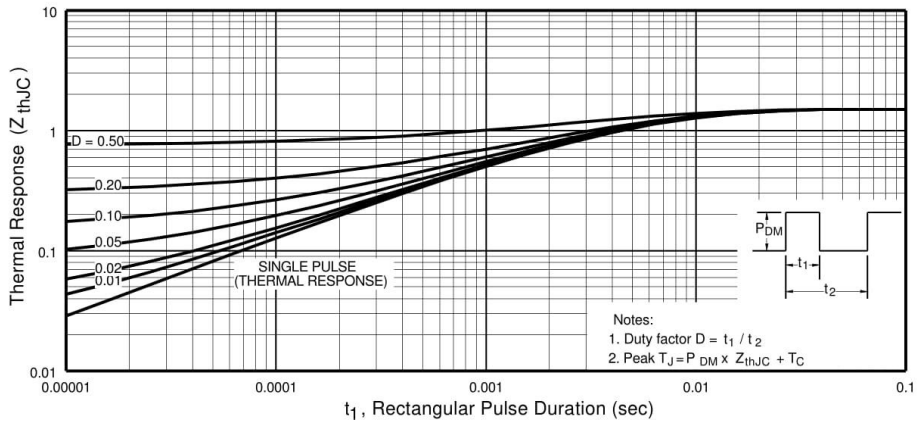


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFZ44N

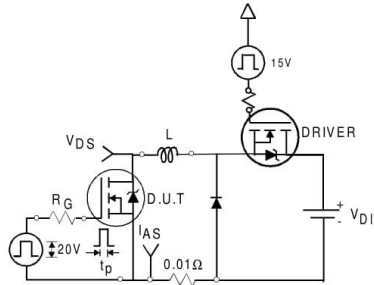


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

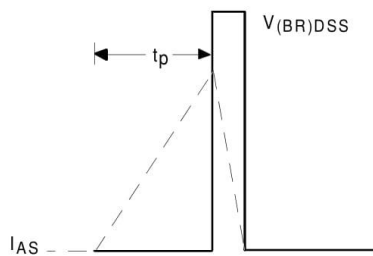


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

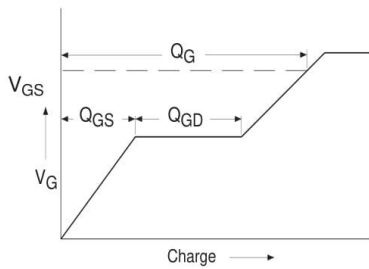


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

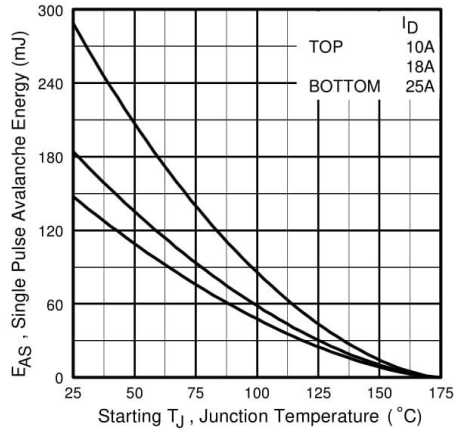


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

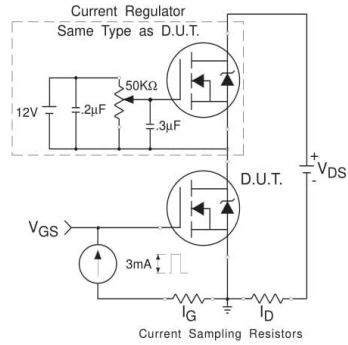
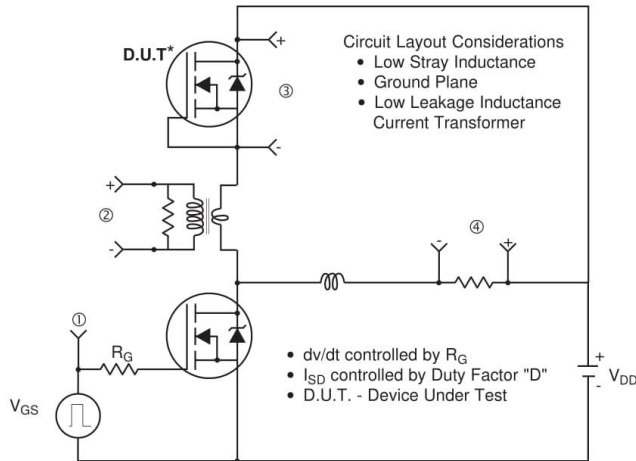
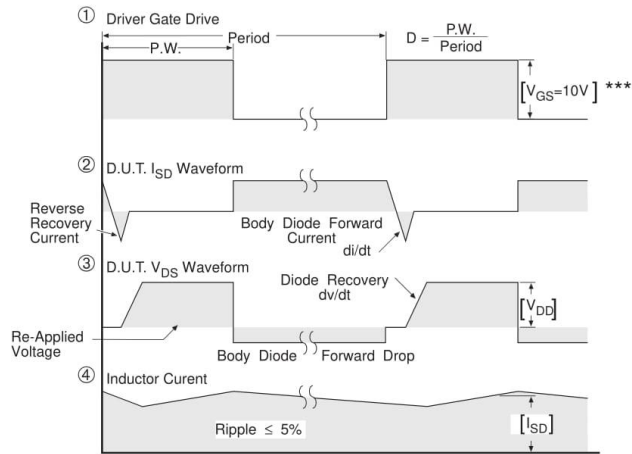


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



* Reverse Polarity of D.U.T for P-Channel



*** $V_{GS} = 5.0V$ for Logic Level and 3V Drive Devices

Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs

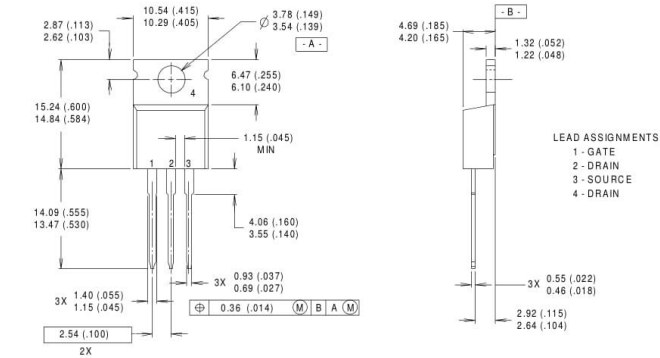
IRFZ44N



Package Outline

TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)

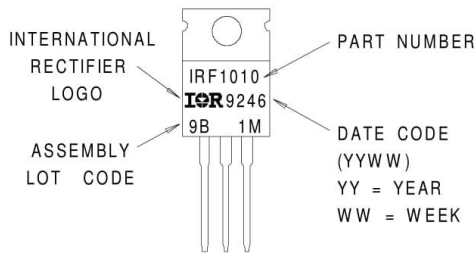


- NOTES:
- 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 - 2 CONTROLLING DIMENSION : INCH
 - 3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
 - 4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

Part Marking Information

TO-220AB

EXAMPLE : THIS IS AN IRF1010
WITH ASSEMBLY
LOT CODE 9B1M



Data and specifications subject to change without notice.
This product has been designed and qualified for the Automotive [Q101] market.
Qualification Standards can be found on IR's Web site.



IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information.01/01

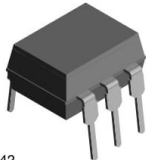
www.irf.com



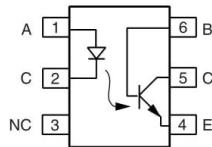
4N35, 4N36, 4N37

Vishay Semiconductors

Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection



21842



I179004-5

FEATURES

- Isolation test voltage 5000 V_{RMS}
- Interfaces with common logic families
- Input-output coupling capacitance < 0.5 pF
- Industry standard dual-in-line 6 pin package
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



APPLICATIONS

- AC mains detection
- Reed relay driving
- Switch mode power supply feedback
- Telephone ring detection
- Logic ground isolation
- Logic coupling with high frequency noise rejection

DESCRIPTION

Each optocoupler consists of gallium arsenide infrared LED and a silicon NPN phototransistor.

AGENCY APPROVALS

- Underwriters laboratory file no. E52744
- BSI: EN 60065:2002, EN 60950:2000
- FIMKO; EN 60065, EN 60335, EN 60950 certificate no. 25156

ORDER INFORMATION	
PART	REMARKS
4N35	CTR > 100 %, DIP-6
4N36	CTR > 100 %, DIP-6
4N37	CTR > 100 %, DIP-6

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (1)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V _R	6	V
Forward current		I _F	50	mA
Surge current	t ≤ 10 μs	I _{FSM}	1	A
Power dissipation		P _{diss}	70	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V _{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V _{EBO}	7	V
Collector current	t ≤ 1 ms	I _C	50	mA
		I _C	100	mA
Power dissipation		P _{diss}	70	mW
COUPLER				
Isolation test voltage		V _{ISO}	5000	V _{RMS}
Creepage			≥ 7	mm
Clearance			≥ 7	mm
Isolation thickness between emitter and detector			≥ 0.4	mm

4N35, 4N36, 4N37



Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototransistor Output,
with Base Connection

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
COUPLER				
Comparative tracking index	DIN IEC 112/VDE 0303, part 1		175	
Isolation resistance	$V_{IO} = 500\text{ V}, T_{amb} = 25\text{ °C}$	R_{IO}	10^{12}	Ω
	$V_{IO} = 500\text{ V}, T_{amb} = 100\text{ °C}$	R_{IO}	10^{11}	Ω
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 150	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature		T_{amb}	- 55 to + 100	$^{\circ}\text{C}$
Junction temperature		T_j	100	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature ⁽²⁾	max. 10 s dip soldering: distance to seating plane $\geq 1.5\text{ mm}$	T_{sld}	260	$^{\circ}\text{C}$

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified.

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

⁽²⁾ Refer to wave profile for soldering conditions for through hole devices (DIP).

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ⁽¹⁾							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT							
Junction capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		C_j		50		pF
Forward voltage ⁽²⁾	$I_F = 10\text{ mA}$		V_F		1.3	1.5	V
	$I_F = 10\text{ mA}, T_{amb} = - 55\text{ °C}$		V_F	0.9	1.3	1.7	V
Reverse current ⁽²⁾	$V_R = 6\text{ V}$		I_R		0.1	10	μA
Capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		C_O		25		pF
OUTPUT							
Collector emitter breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 1\text{ mA}$	4N35	BV_{CEO}	30			V
		4N36	BV_{CEO}	30			V
		4N37	BV_{CEO}	30			V
Emitter collector breakdown voltage ⁽²⁾	$I_E = 100\text{ }\mu\text{A}$		BV_{ECO}	7			V
OUTPUT							
Collector base breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 100\text{ }\mu\text{A}, I_B = 1\text{ }\mu\text{A}$	4N35	BV_{CBO}	70			V
		4N36	BV_{CBO}	70			V
		4N37	BV_{CBO}	70			V
Collector emitter leakage current ⁽²⁾	$V_{CE} = 10\text{ V}, I_F = 0$	4N35	I_{CEO}		5	50	nA
		4N36	I_{CEO}		5	50	nA
	$V_{CE} = 10\text{ V}, I_F = 0$	4N37	I_{CEO}		5	50	nA
		4N35	I_{CEO}			500	μA
	$V_{CE} = 30\text{ V}, I_F = 0,$ $T_{amb} = 100\text{ °C}$	4N36	I_{CEO}			500	μA
		4N37	I_{CEO}			500	μA
Collector emitter capacitance	$V_{CE} = 0$		C_{CE}		6		pF
COUPLER							
Resistance, input output ⁽²⁾	$V_{IO} = 500\text{ V}$		R_{IO}	10^{11}			Ω
Capacitance, input output	$f = 1\text{ MHz}$		C_{IO}		0.6		pF

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified.

Minimum and maximum values are testing requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.

⁽²⁾ Indicates JEDEC registered value.



4N35, 4N36, 4N37

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors with Base Connection

CURRENT TRANSFER RATIO							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT
DC current transfer ratio ⁽¹⁾	$V_{CE} = 10\text{ V}, I_F = 10\text{ mA}$	4N35	CTR_{DC}	100			%
		4N36	CTR_{DC}	100			%
		4N37	CTR_{DC}	100			%
	$V_{CE} = 10\text{ V}, I_F = 10\text{ mA}, T_A = -55\text{ }^\circ\text{C to } +100\text{ }^\circ\text{C}$	4N35	CTR_{DC}	40	50		%
		4N36	CTR_{DC}	40	50		%
		4N37	CTR_{DC}	40	50		%

Note

⁽¹⁾ Indicates JEDEC registered values.

SWITCHING CHARACTERISTICS							
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	
Switching time ⁽¹⁾	$V_{CC} = 10\text{ V}, I_C = 2\text{ mA}, R_L = 100\text{ }\Omega$	t_{on}, t_{off}		10		μs	

Note

⁽¹⁾ Indicates JEDEC registered values.

TYPICAL CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

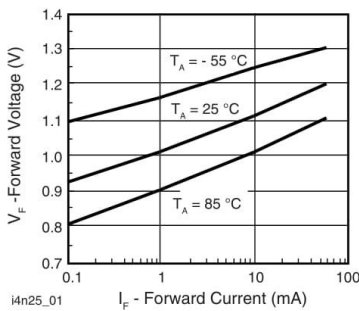


Fig. 1 - Forward Voltage vs. Forward Current

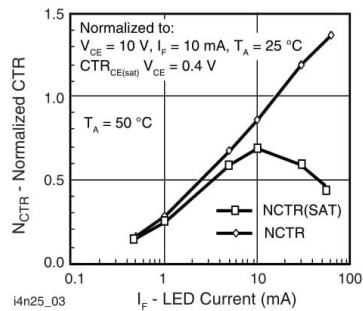


Fig. 3 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

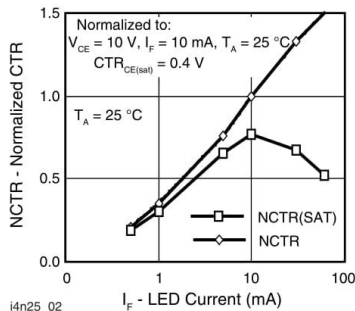


Fig. 2 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

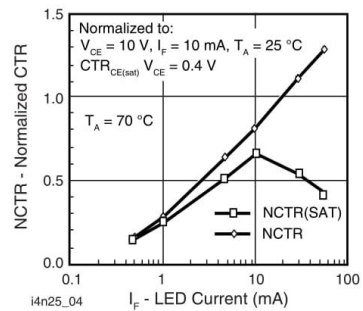


Fig. 4 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

4N35, 4N36, 4N37

Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection

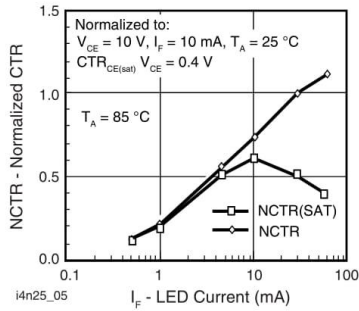


Fig. 5 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

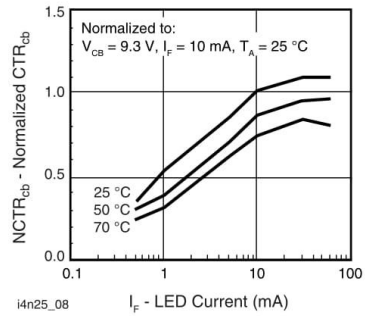


Fig. 8 - Normalized CTR_{cb} vs. LED Current and Temperature

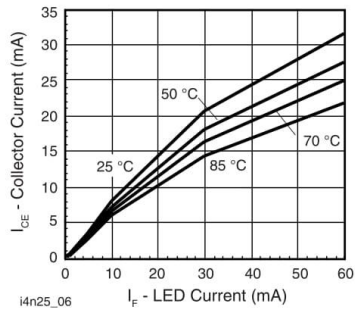


Fig. 6 - Collector Emitter Current vs. Temperature and LED Current

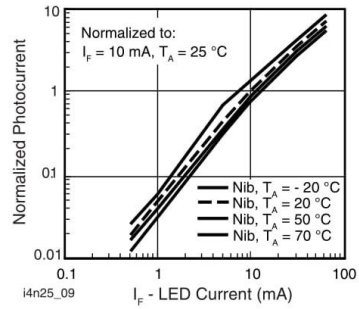


Fig. 9 - Normalized Photocurrent vs. I_F and Temperature

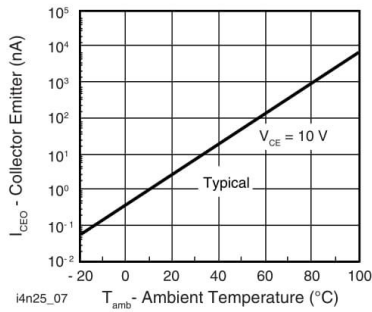


Fig. 7 - Collector Emitter Leakage Current vs. Temperature

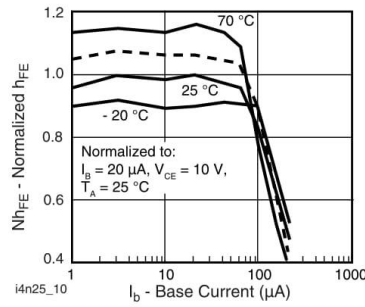


Fig. 10 - Normalized Non-Saturated h_{FE} vs. Base Current and Temperature



4N35, 4N36, 4N37

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors with Base Connection

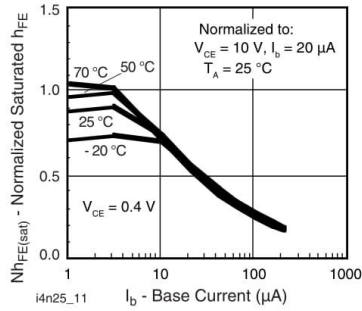
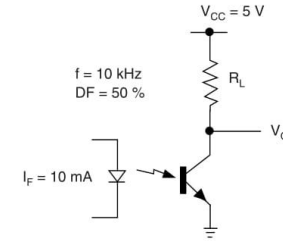


Fig. 11 - Normalized h_{FE} vs. Base Current and Temperature



i4n25_14

Fig. 14 - Switching Schematic

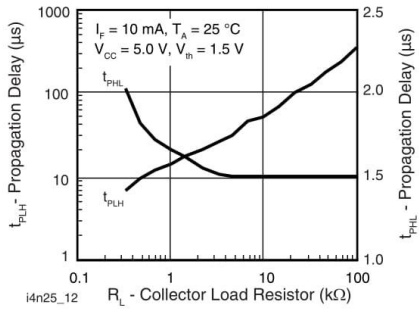
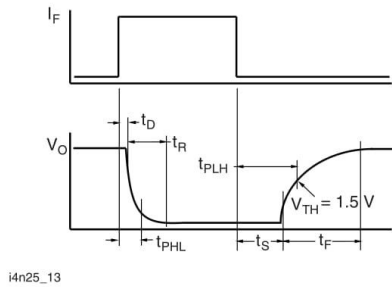


Fig. 12 - Propagation Delay vs. Collector Load Resistor



i4n25_13

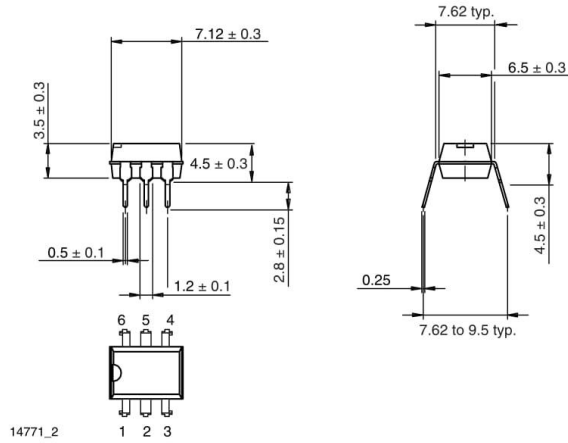
Fig. 13 - Switching Timing

4N35, 4N36, 4N37

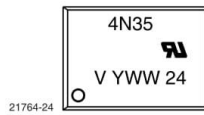
Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototransistor Output,
with Base Connection



PACKAGE DIMENSIONS in millimeters



PACKAGE MARKING





Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

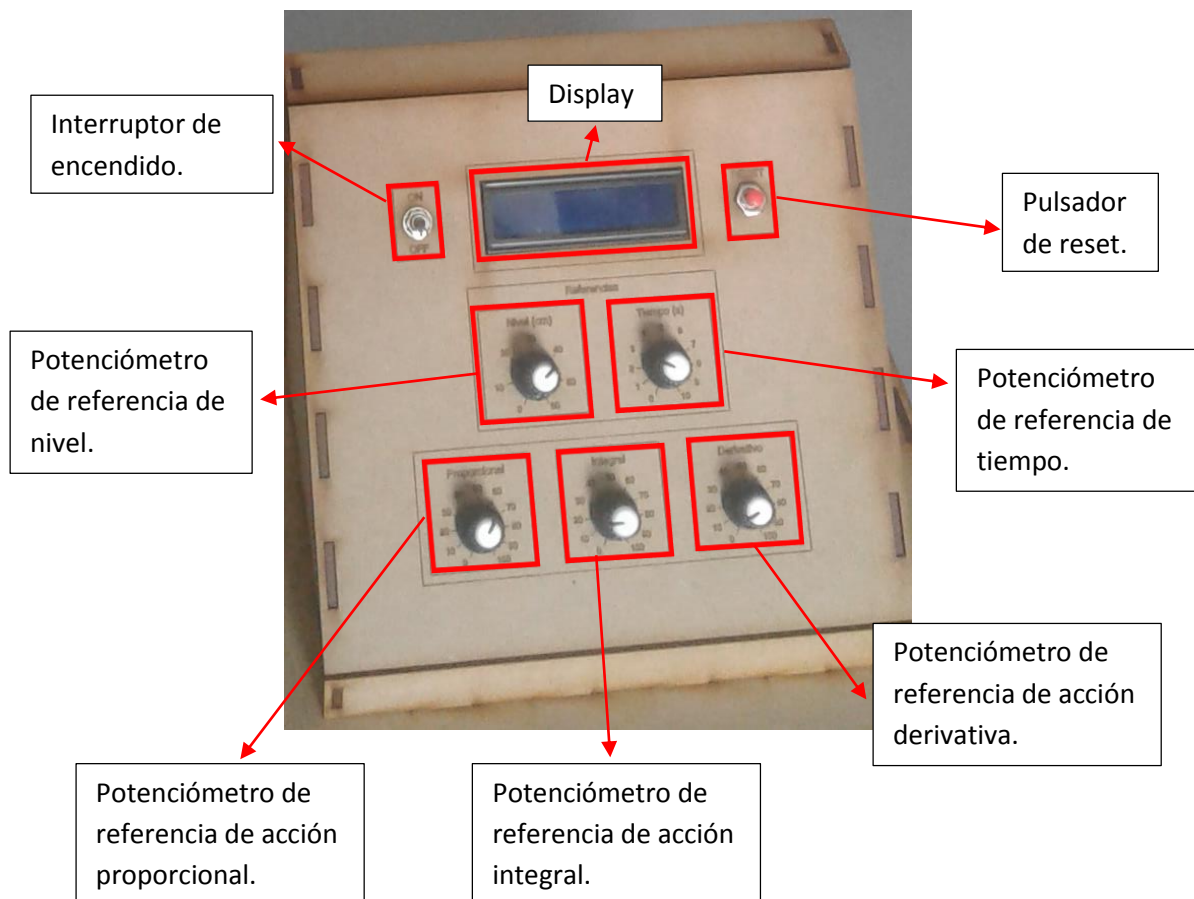
Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Anexo J

Instructivo del sistema

En el HMI se pueden identificar un display que nos permite visualizar la información del sistema como el nivel actual de la esfera y en la parte inferior se pueden apreciar 5 potenciómetros para las entradas.



- ✓ **Interruptor de encendido:** Permite proporcionar energía al sistema.
- ✓ **Pulsador de reset:** Permite reiniciar el sistema.
- ✓ **Display:** Muestra datos importantes como el nivel actual de la esfera y la referencia introducida.
- ✓ **Potenciómetro de referencia de nivel:** Permite ingresar el nivel en el que se desea que la esfera se posicione.
- ✓ **Potenciómetro de referencia de tiempo:** Permite ingresar el valor de tiempo en el que la esfera debe alcanzar el nivel deseado.
- ✓ **Potenciómetro de acción proporcional:** Permite ingresar el valor de K_p . Que corresponde a la acción proporcional del control PID
- ✓ **Potenciómetro de acción integral:** Permite ingresar el valor de K_i . Que corresponde a la acción integral del control PID
- ✓ **Potenciómetro de acción derivativa:** Permite ingresar el valor de K_d . Que corresponde a la acción derivativa del control PID.



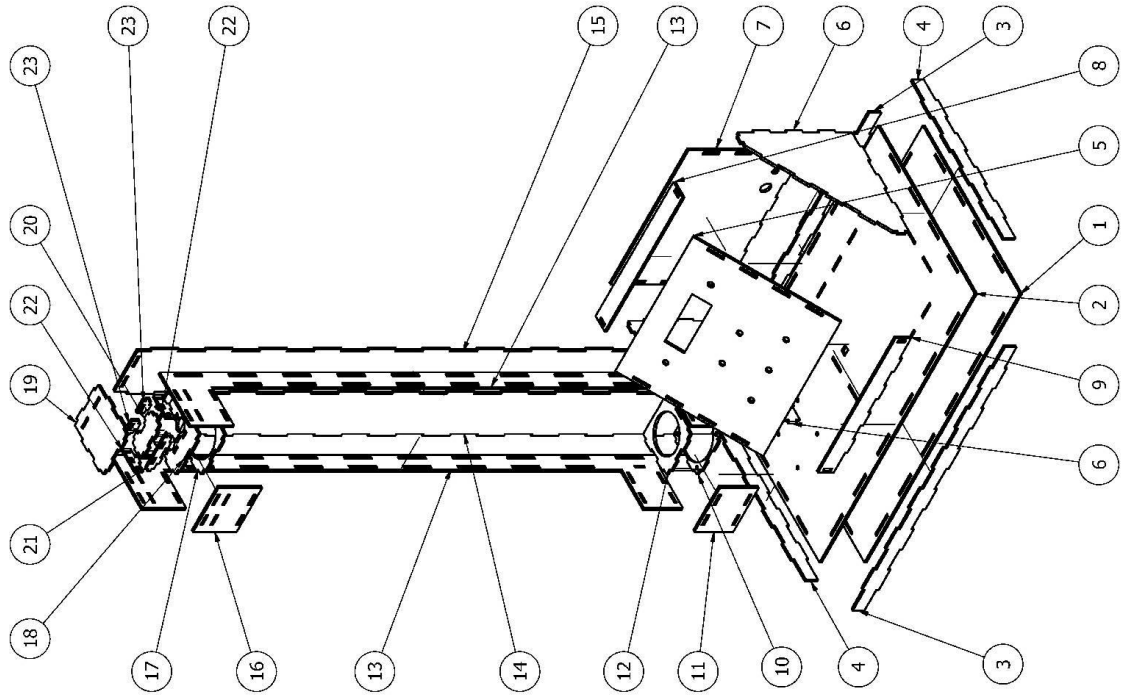
El sistema tubo – esfera comprende el soporte del tubo, dentro del cual se encuentra una esfera de tecnopor, cualquier cambio que se genere se verá reflejada en la esfera, la cual tiene como objetivo estabilizarse en el nivel deseado, valor el cual un operario introducirá a través del HMI con el potenciómetro de referencia de nivel.

La rapidez con la que se estabiliza la esfera o alcanza el nuevo valor de nivel, dependerá del valor introducido por el potenciómetro de referencia de tiempo.

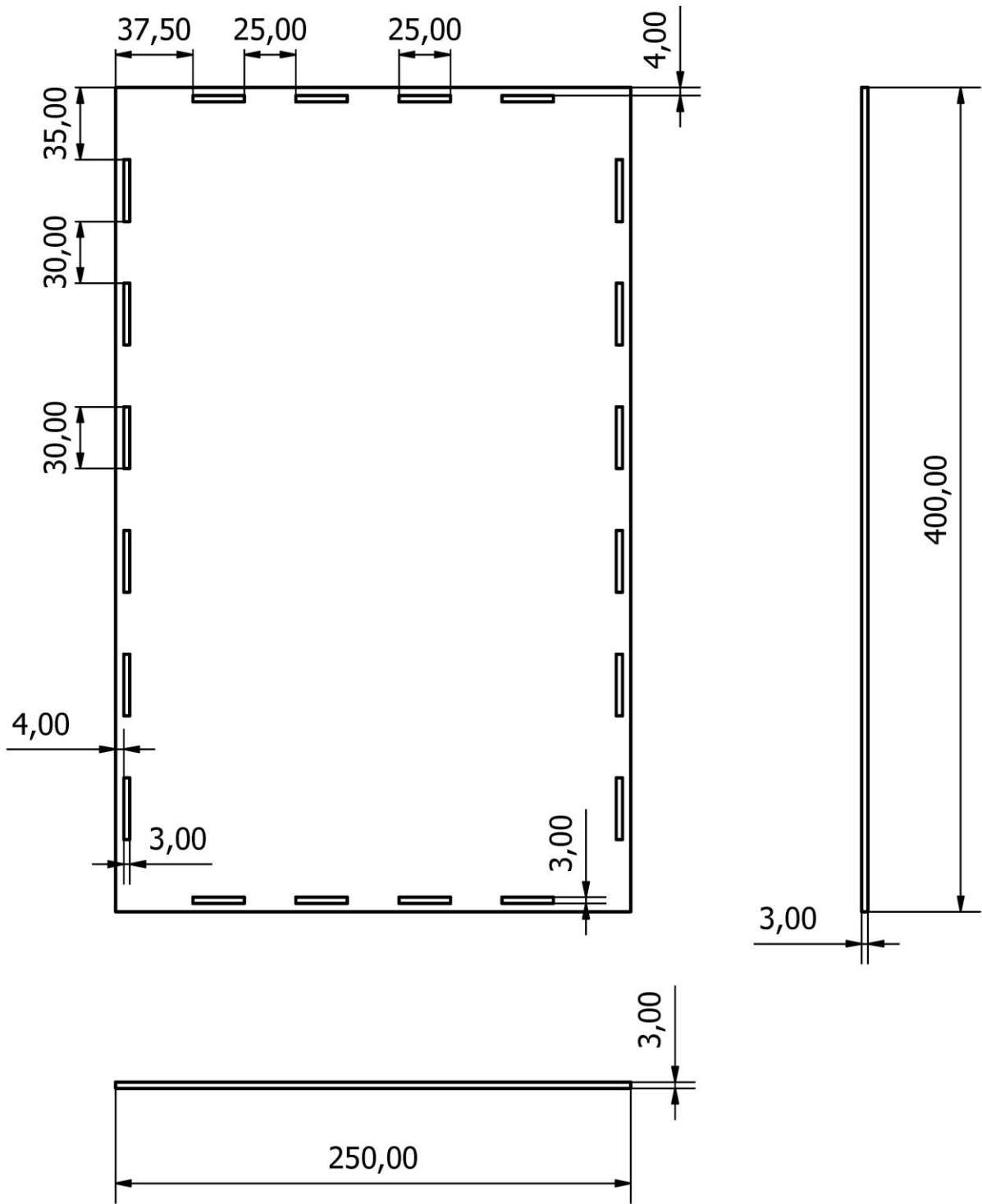
Anexo K

Planos del prototipo

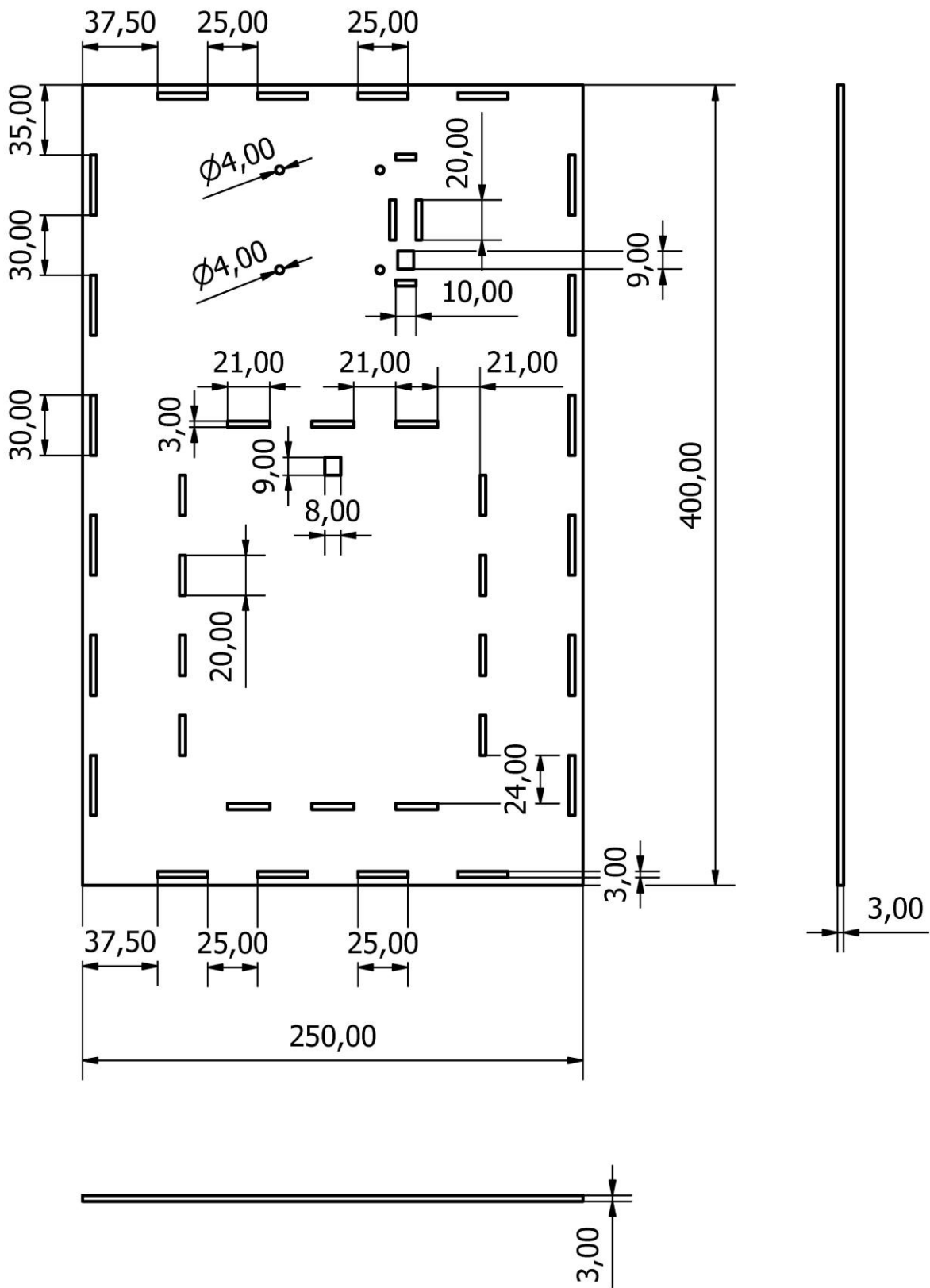
Los planos que se presentan corresponden al prototipo implementado.



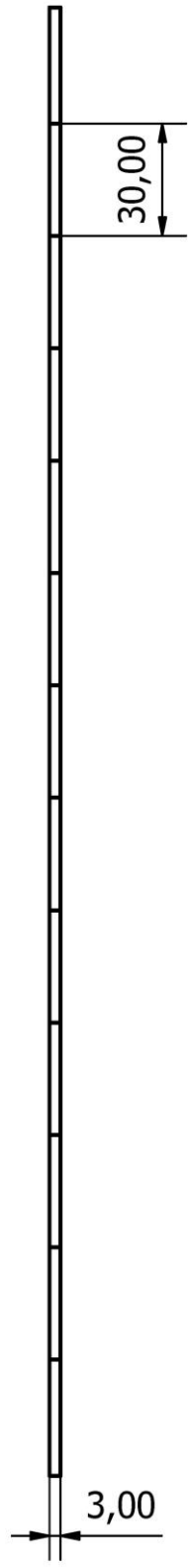
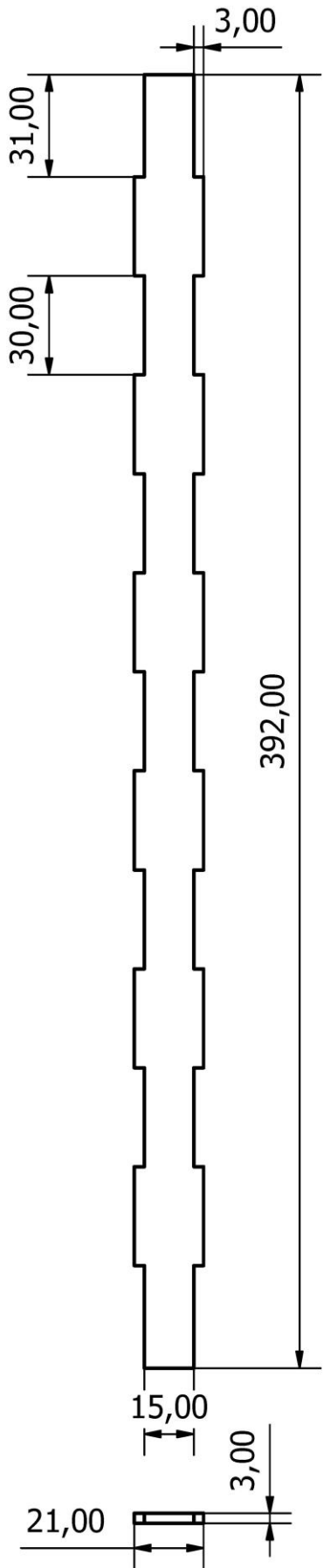
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	1	Elemento N°1 de la base
2	1	Elemento N°2 de la base
3	2	Elemento N°3 de la base
4	2	Elemento N°4 de la base
5	1	Elemento N°1 del tablero
6	2	Elemento N°2 del tablero
7	1	Elemento N°3 del tablero
8	1	Elemento N°4 del tablero
9	1	Elemento N°5 del tablero
10	4	Elemento N°1 del soporte
11	1	Elemento N°2 del soporte
12	1	Elemento N°3 del soporte
13	2	Elemento N°4 del soporte
14	1	Elemento N°5 del soporte
15	1	Elemento N°6 del soporte
16	1	Elemento N°7 del soporte
17	1	Elemento N°8 del soporte
18	1	Elemento N°9 del soporte
19	1	Elemento N°10 del soporte
20	1	Elemento N°11 del soporte
21	1	Elemento N°12 del soporte
22	2	Elemento N°13 del soporte
23	2	Elemento N°14 del soporte



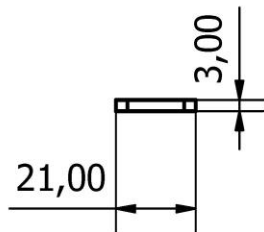
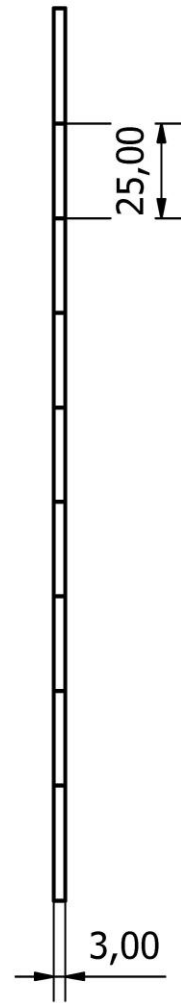
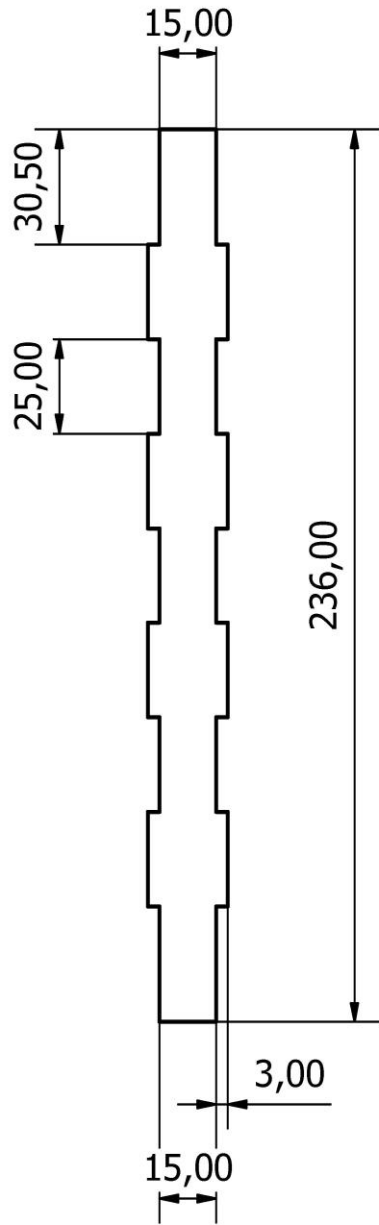
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 3	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 1	Edición 1	Hoja 2 / 24



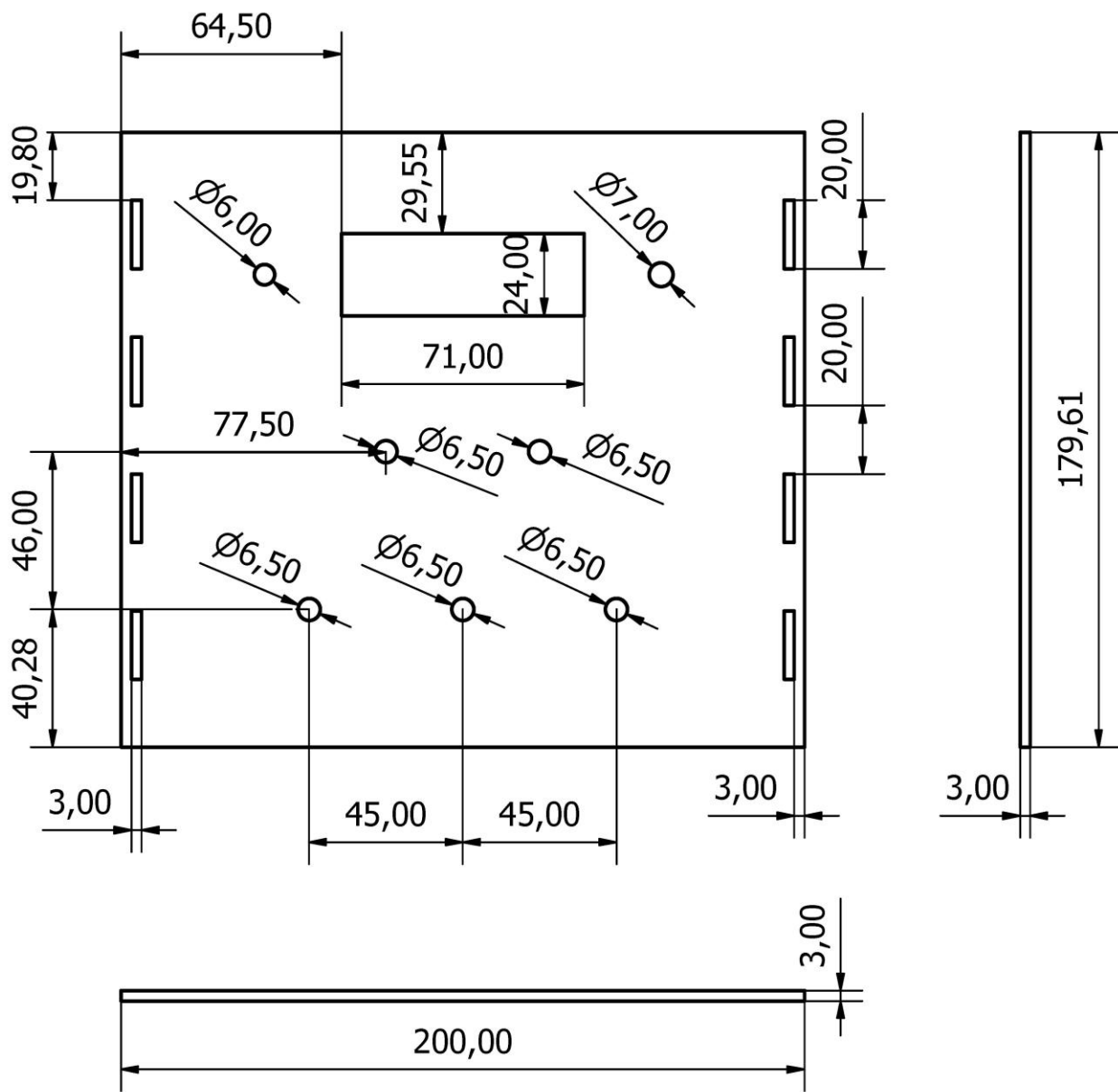
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 3	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental		Sistema Tubo - Esfera			
		Nº de elemento 2	Edición 1	Hoja 3 / 24	



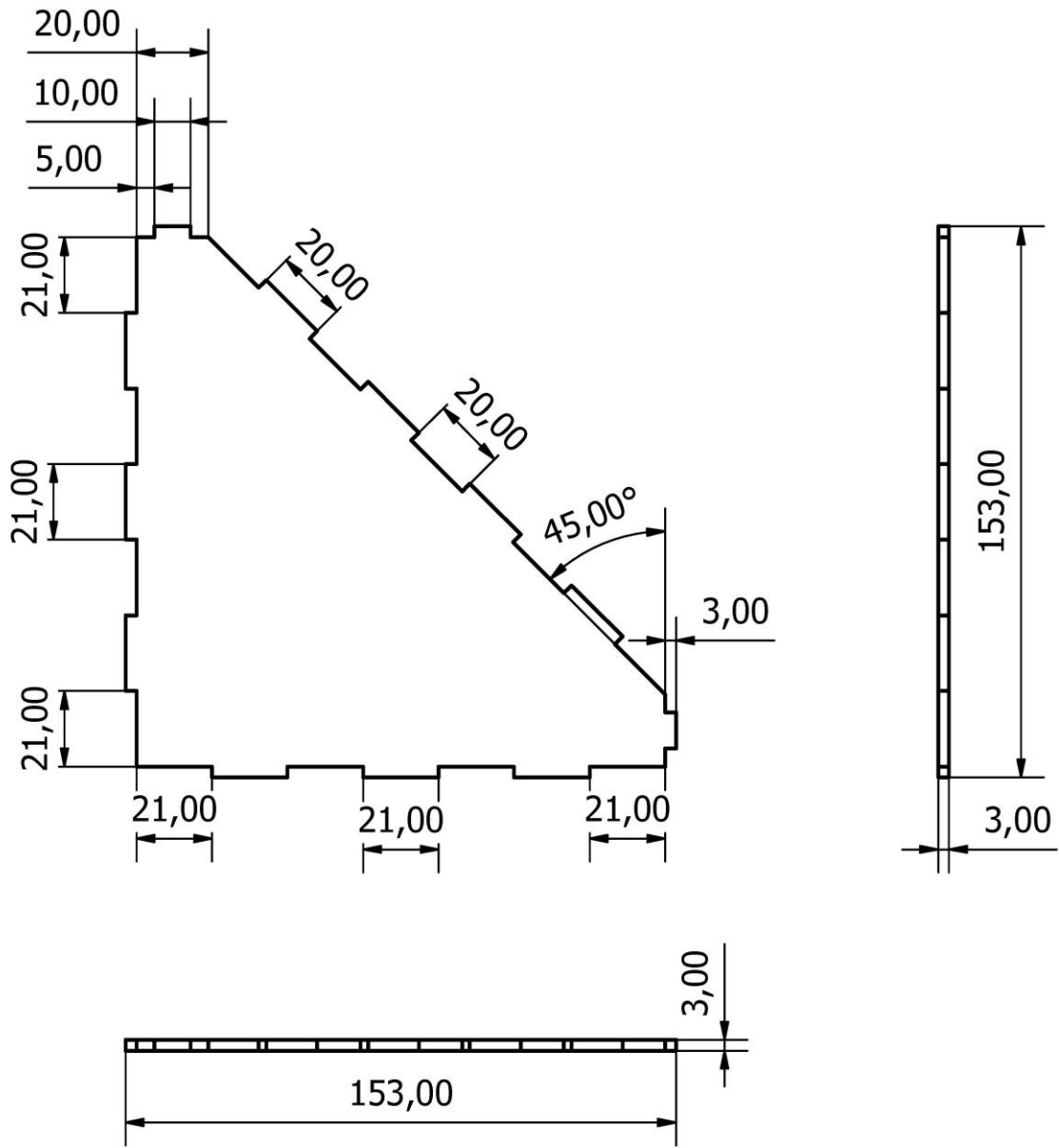
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 2	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental		Sistema Tubo - Esfera			
		Nº de elemento 3	Edición 1	Hoja 4 / 24	



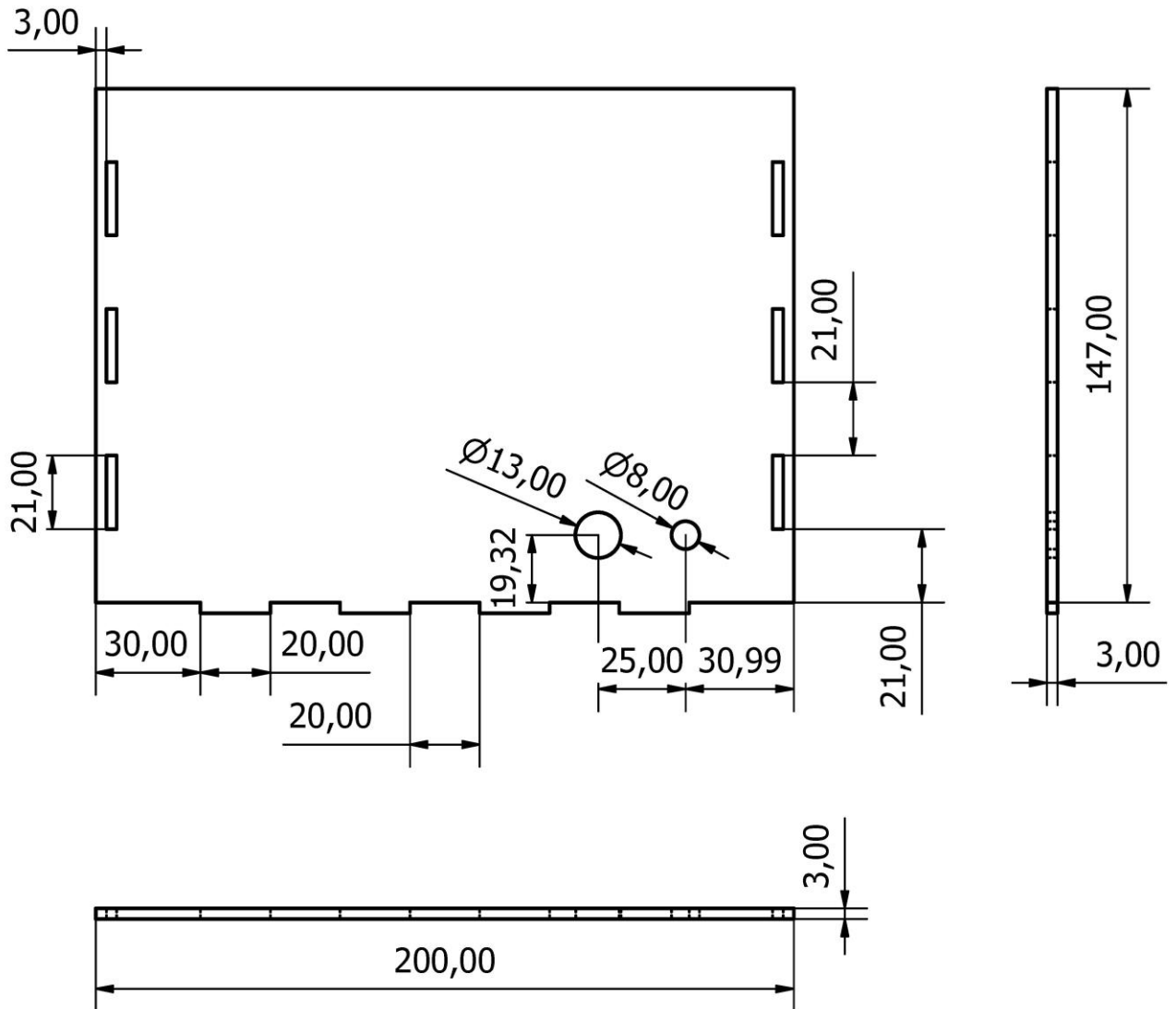
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 2	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 4	Edición 1	Hoja 5 / 24



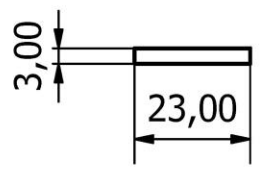
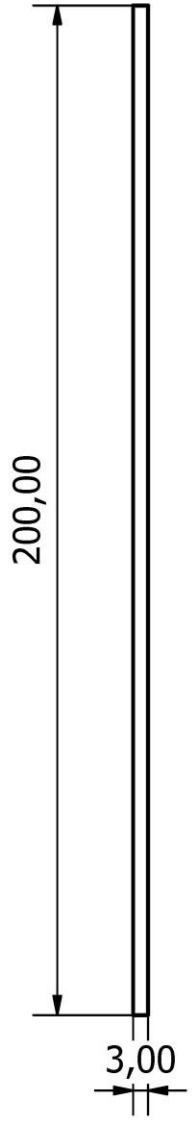
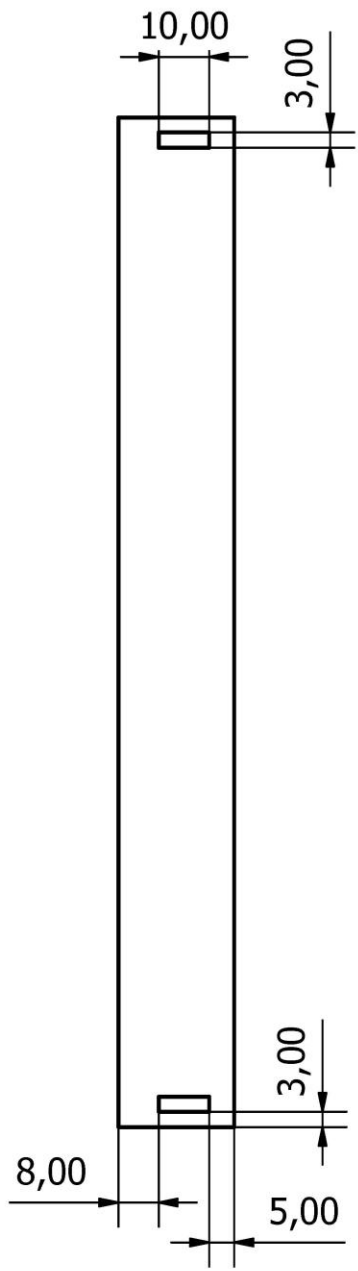
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 2	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 5	Edición 1	Hoja 6 / 24



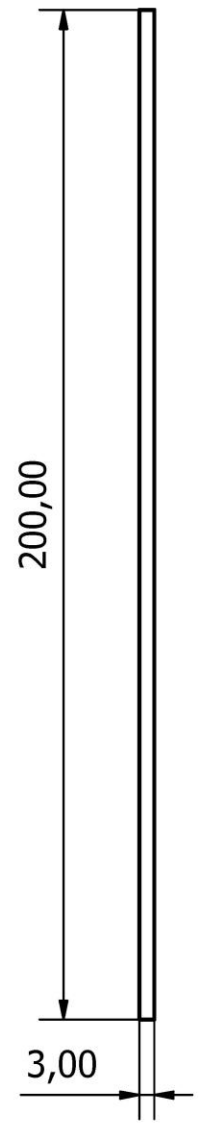
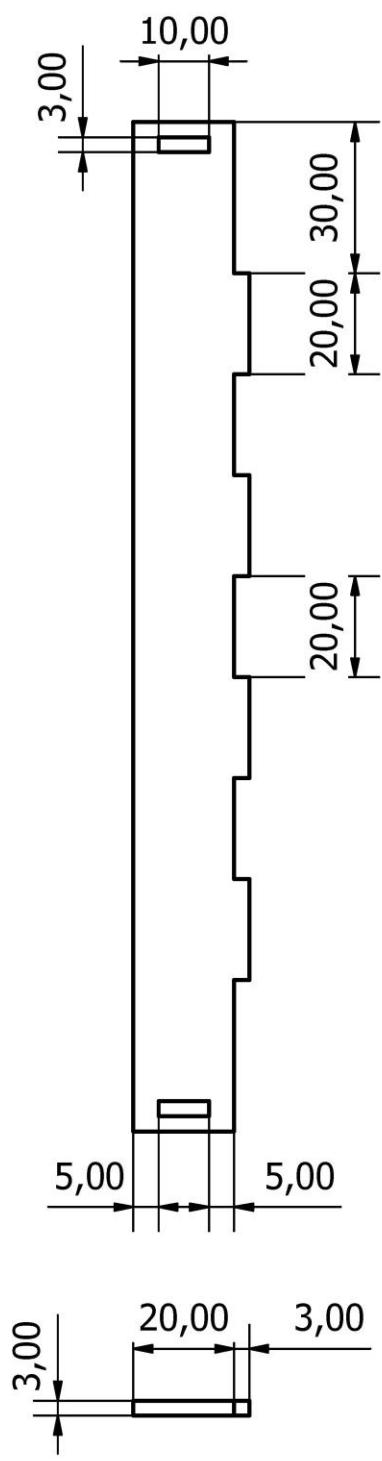
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 2	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 6	Edición 1	Hoja 7 / 24



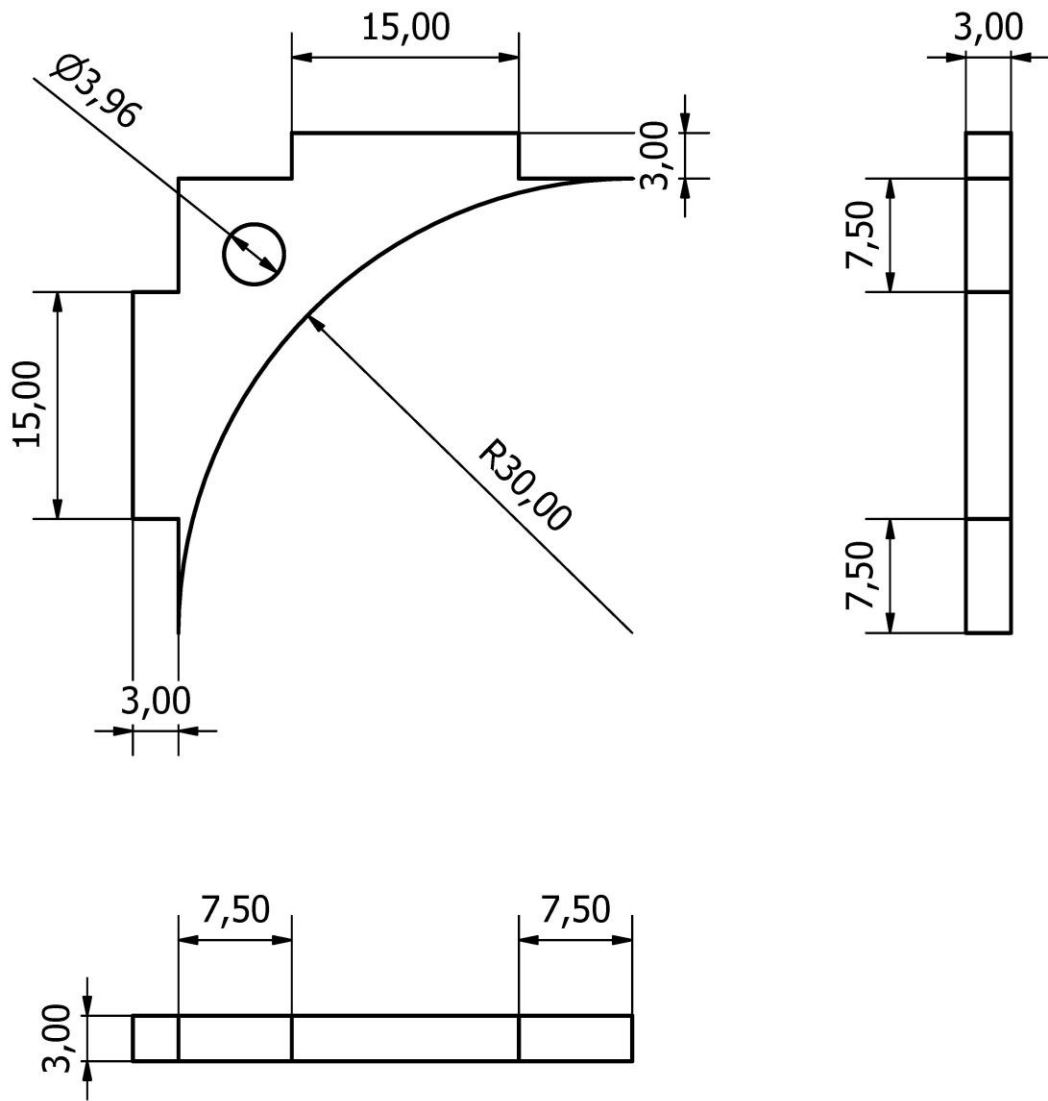
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 2	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental		Sistema Tubo - Esfera			
		Nº de elemento 7	Edición 1	Hoja 8 / 24	



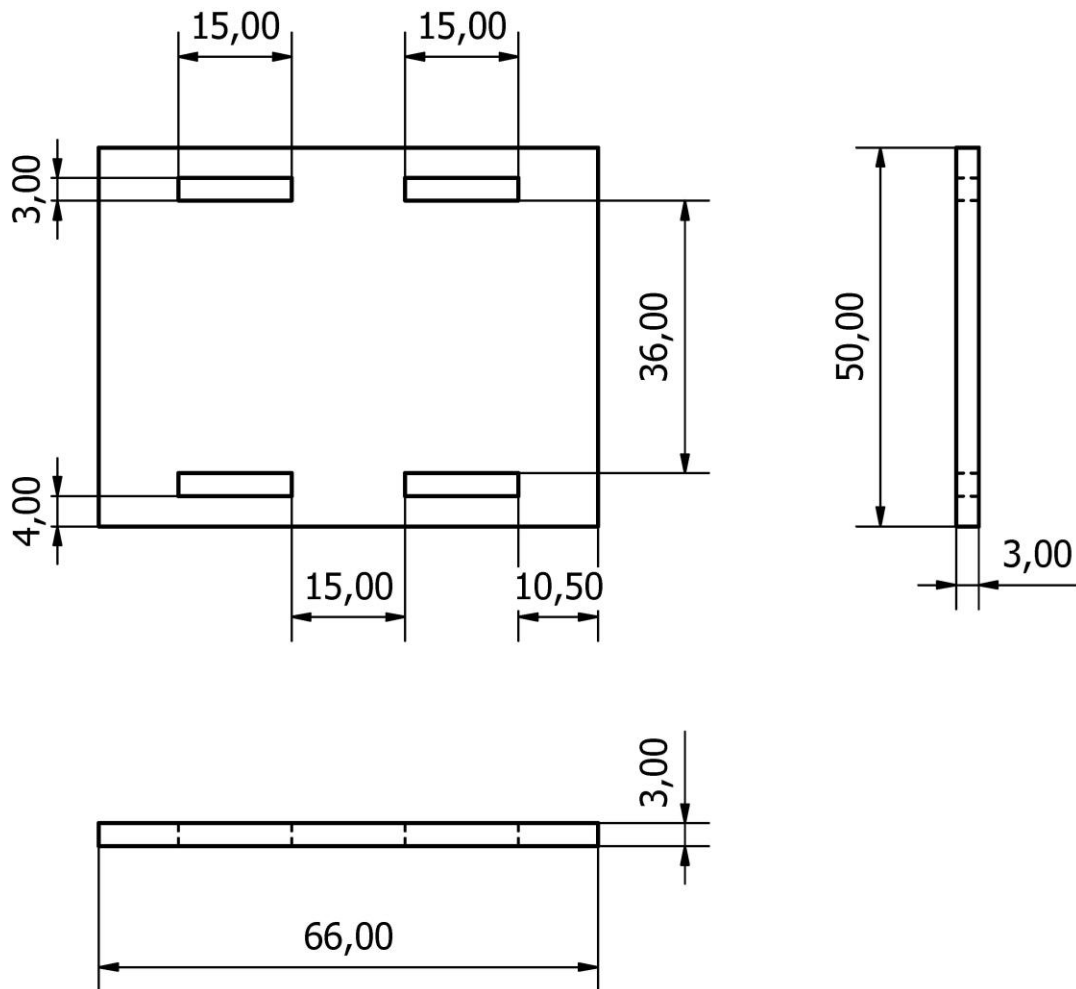
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1.5	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental		Sistema Tubo - Esfera			
		Nº de elemento 8	Edición 1	Hoja 9 / 24	



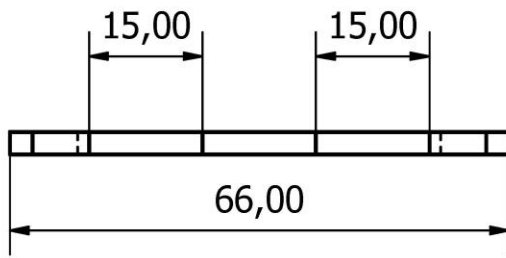
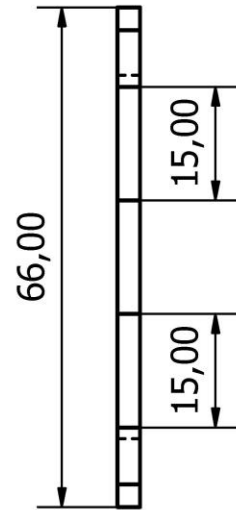
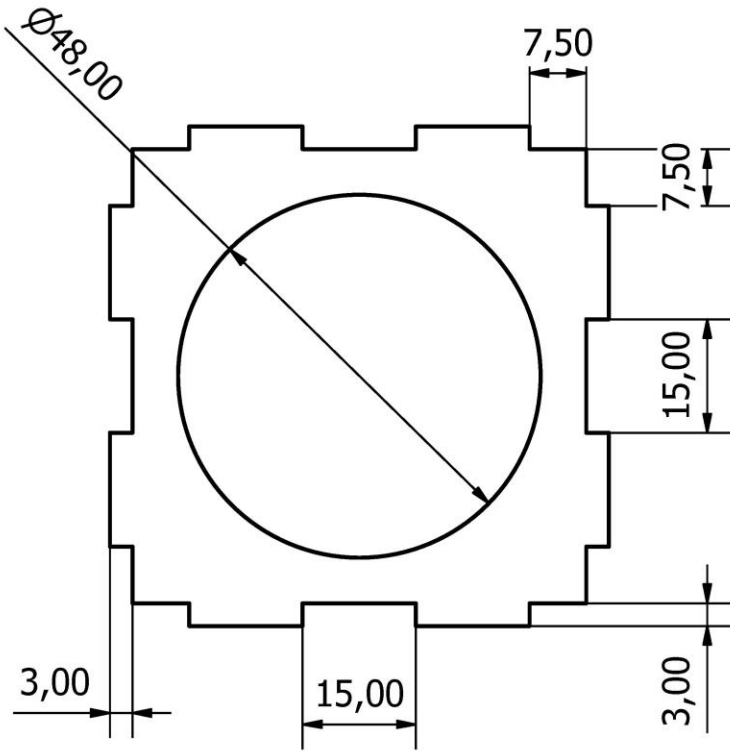
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1.5	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 9	Edición 1	Hoja 10 / 24



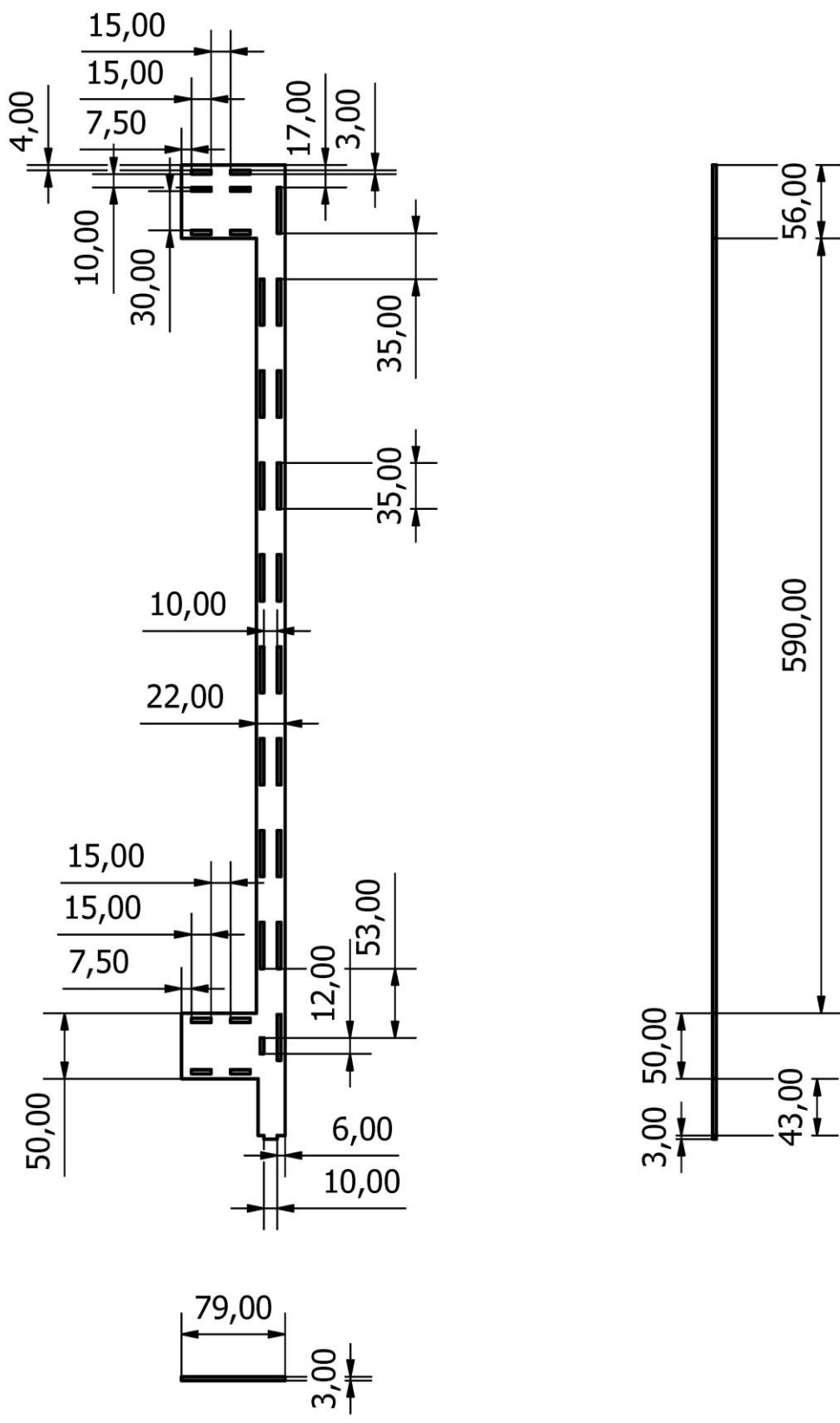
Diseño de Alberto Torres	Escala 2 : 1	Aprobado por	Cantidad 4	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 10	Edición 1	Hoja 11 / 24



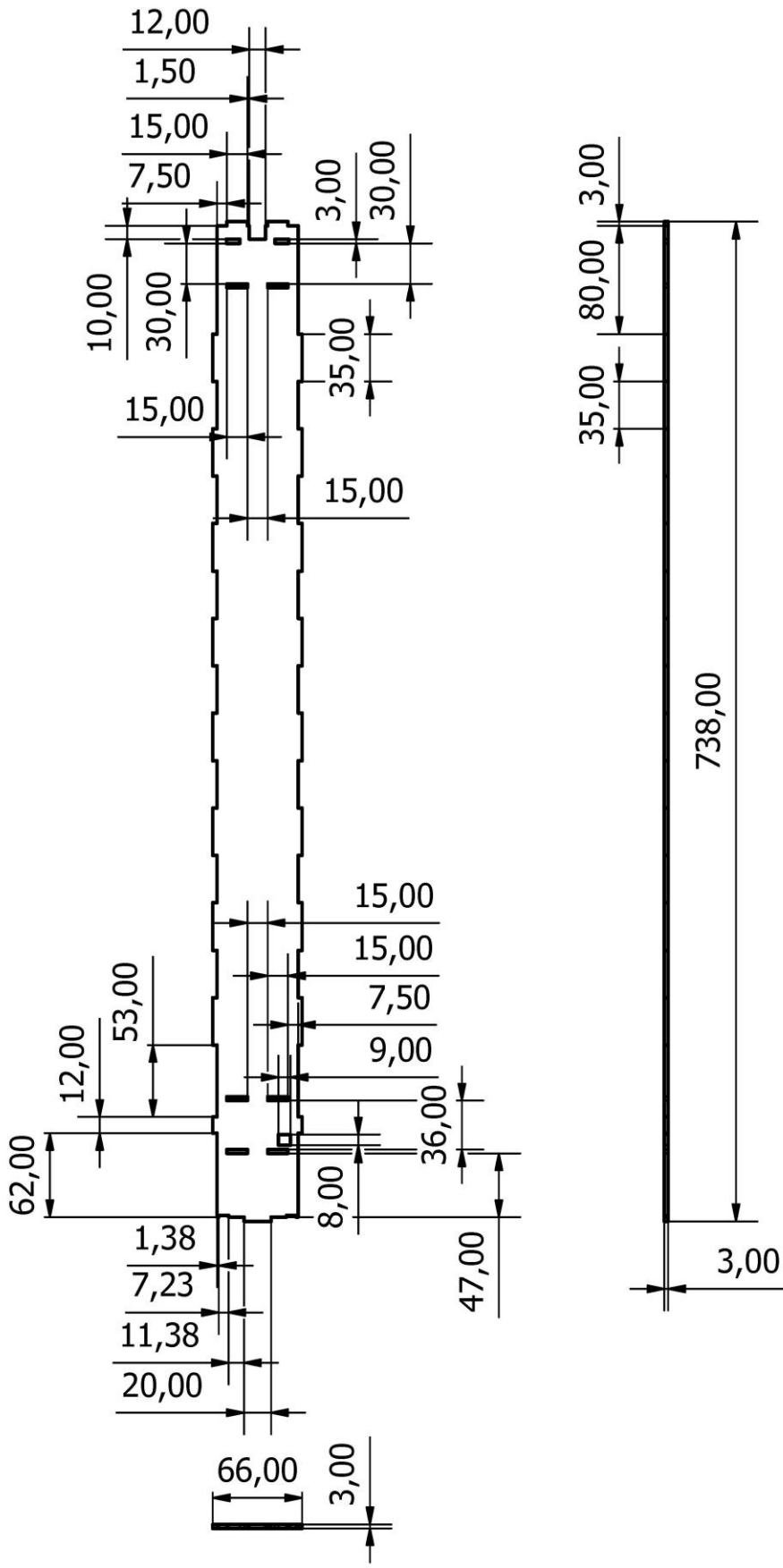
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 11	Edición 1	Hoja 12 / 24



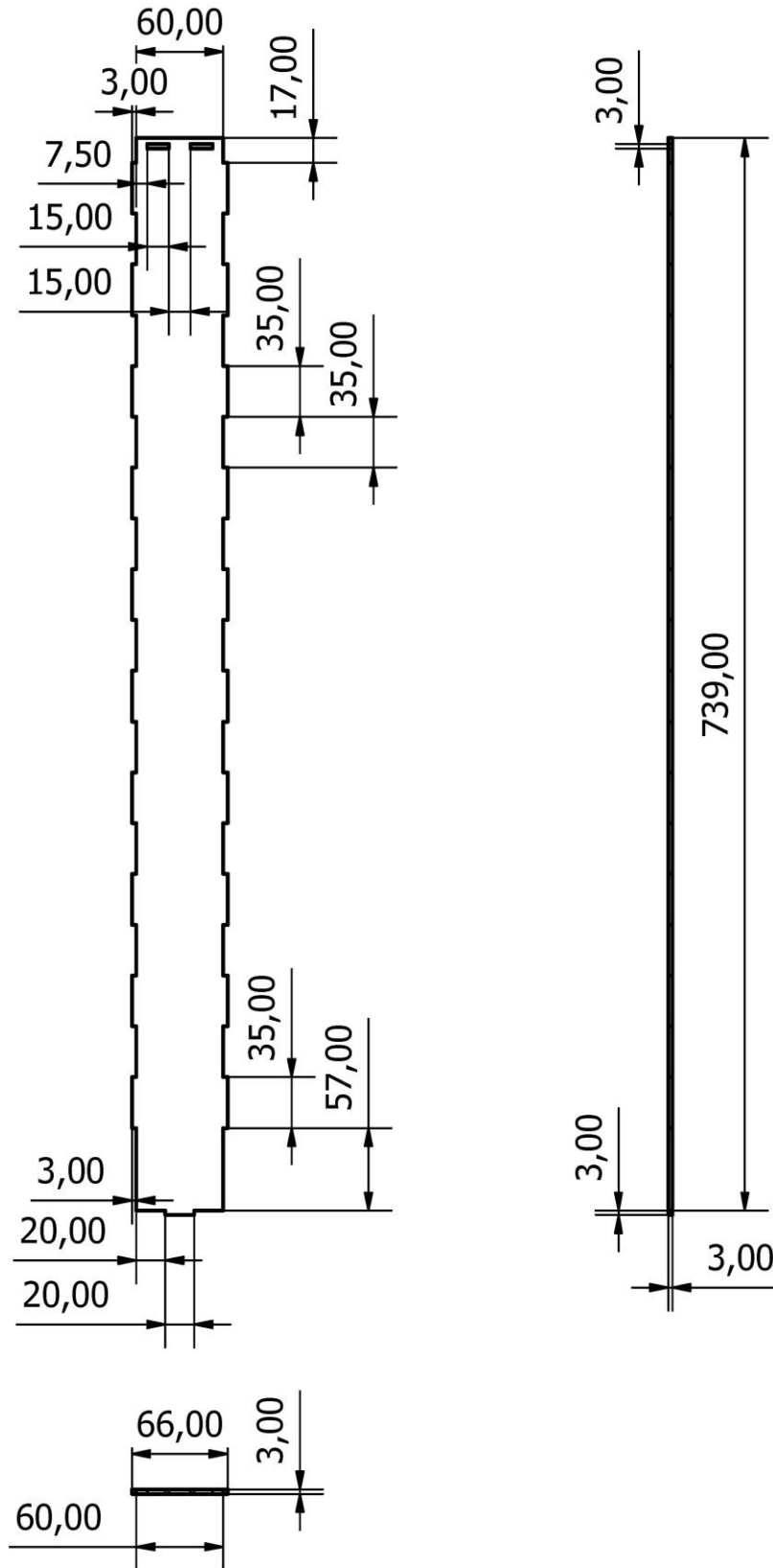
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 12	Edición 1	Hoja 13 / 24



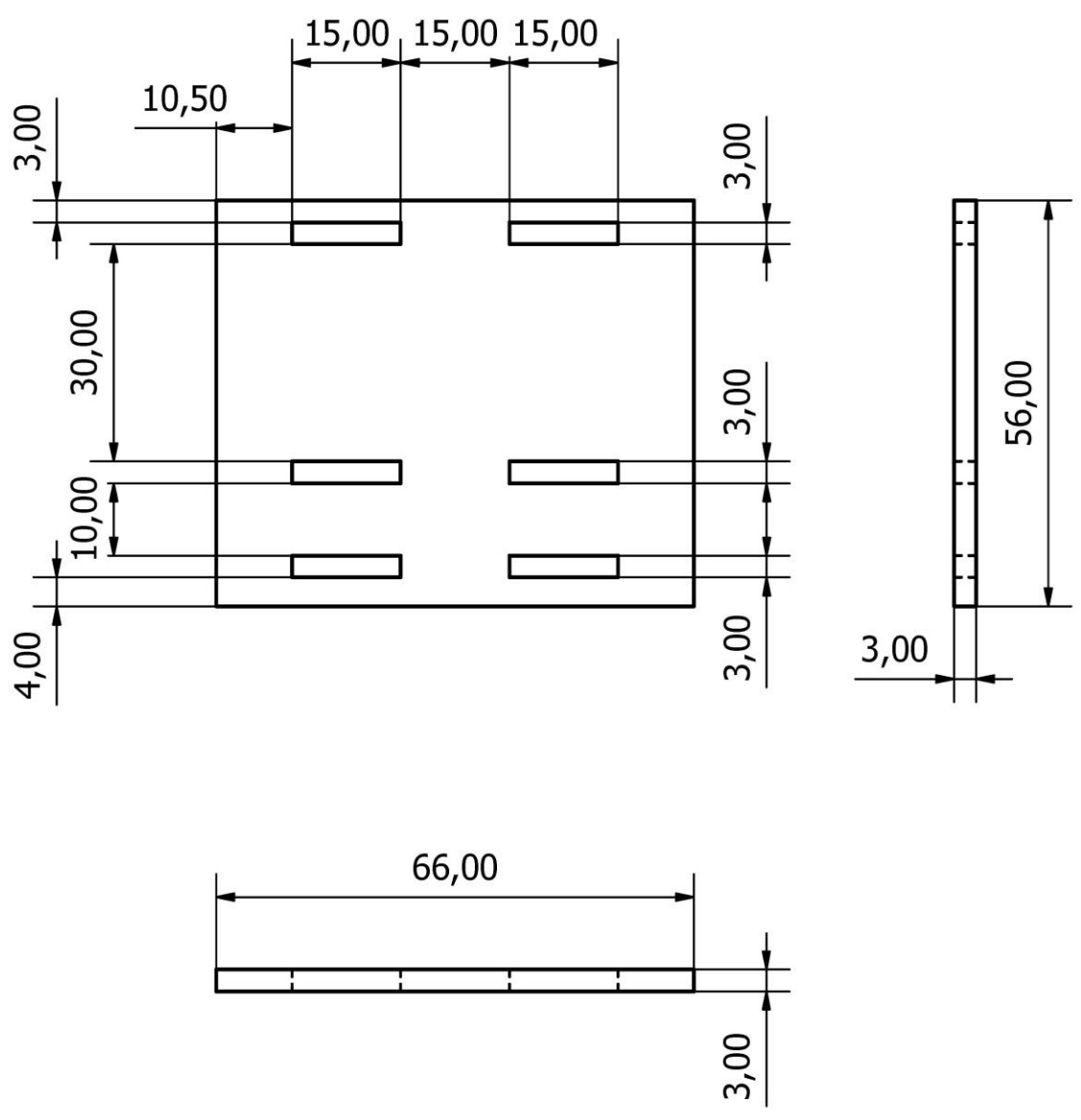
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 5	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 13	Edición 1	Hoja 14 / 24



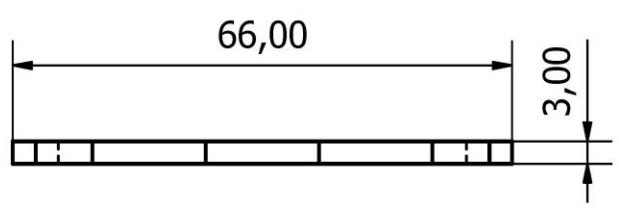
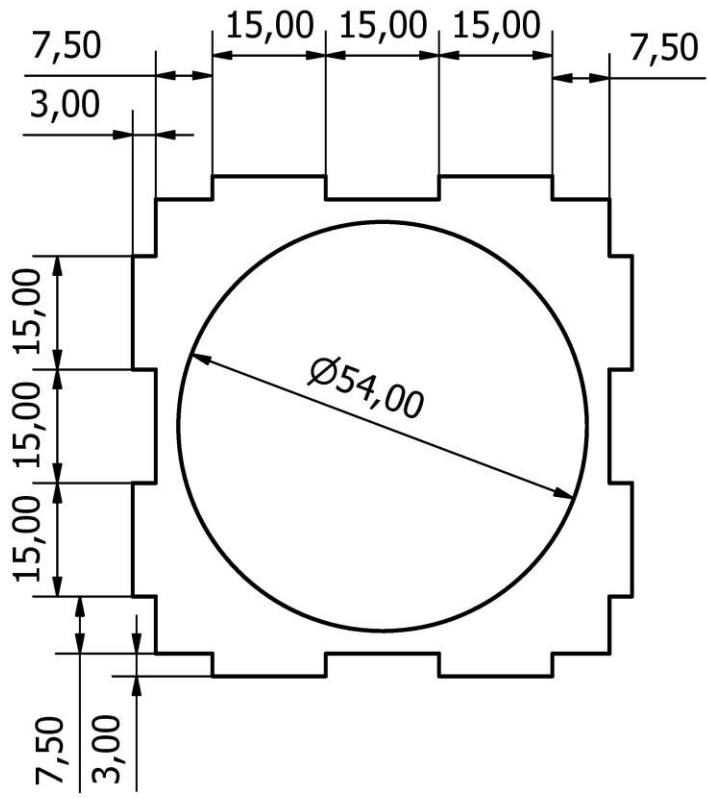
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 5	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 14	Edición 1	Hoja 15 / 24



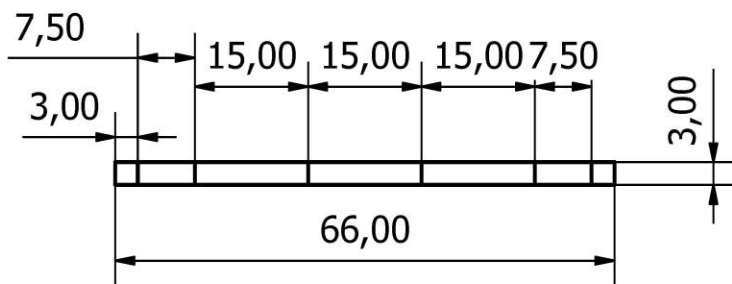
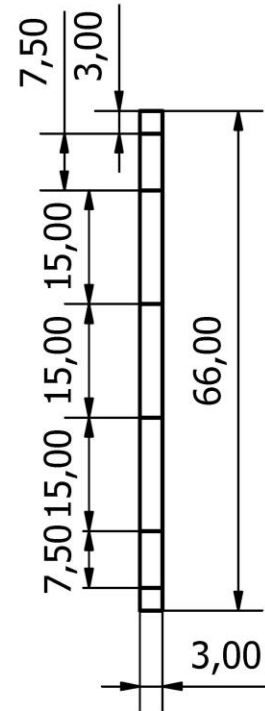
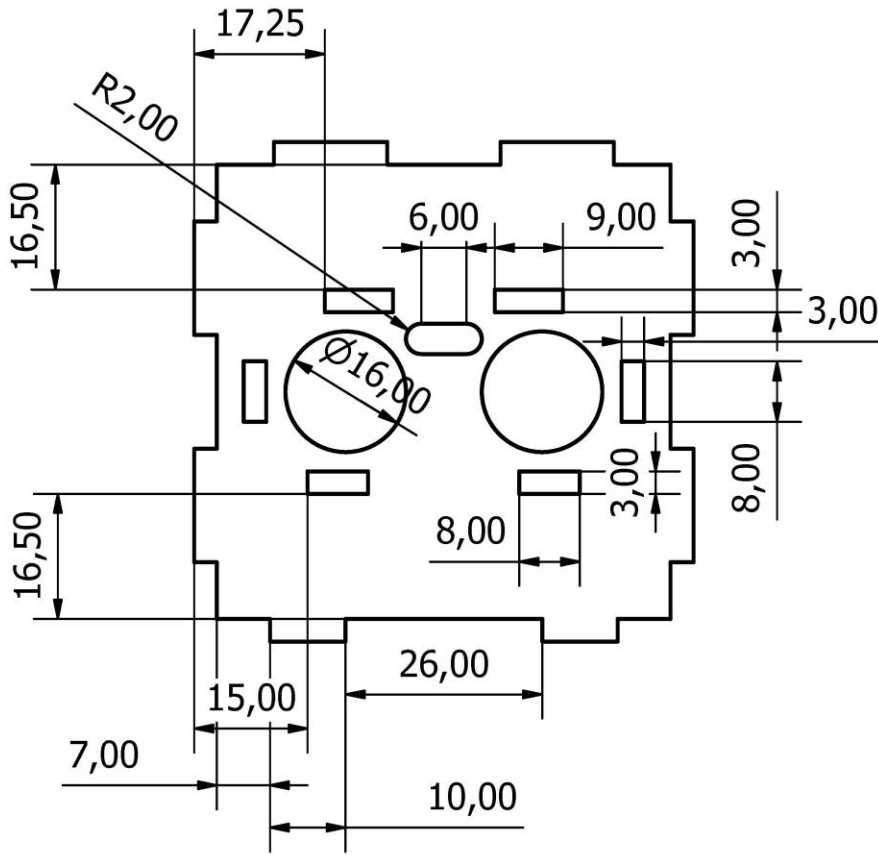
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 5	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 15	Edición 1	Hoja 16 / 24



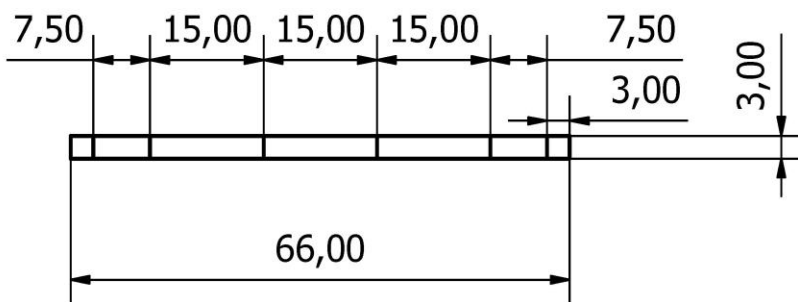
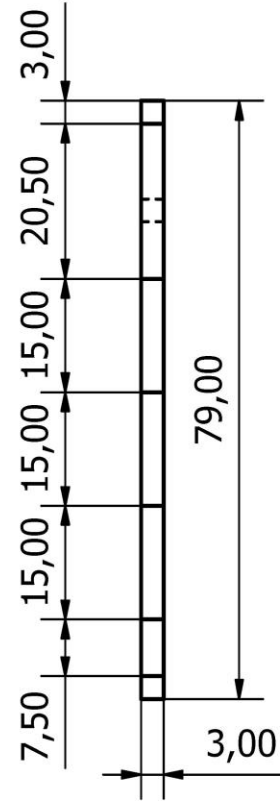
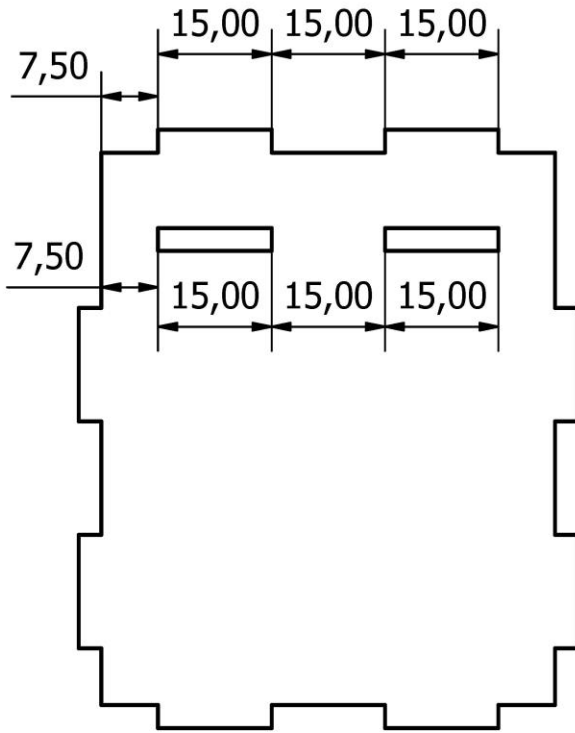
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 16	Edición 1	Hoja 17 / 24



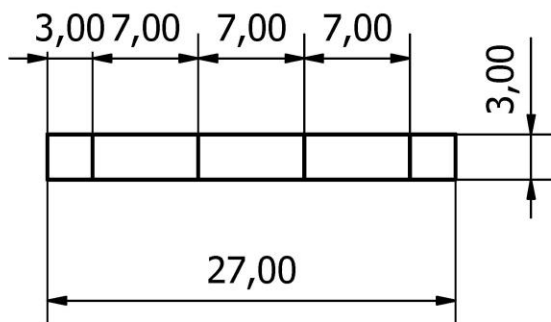
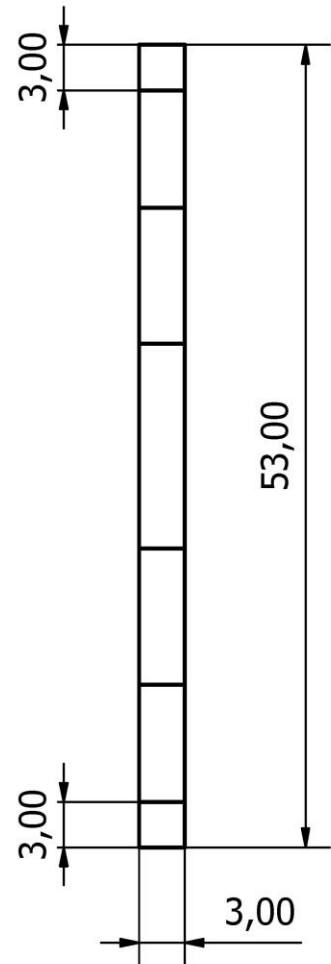
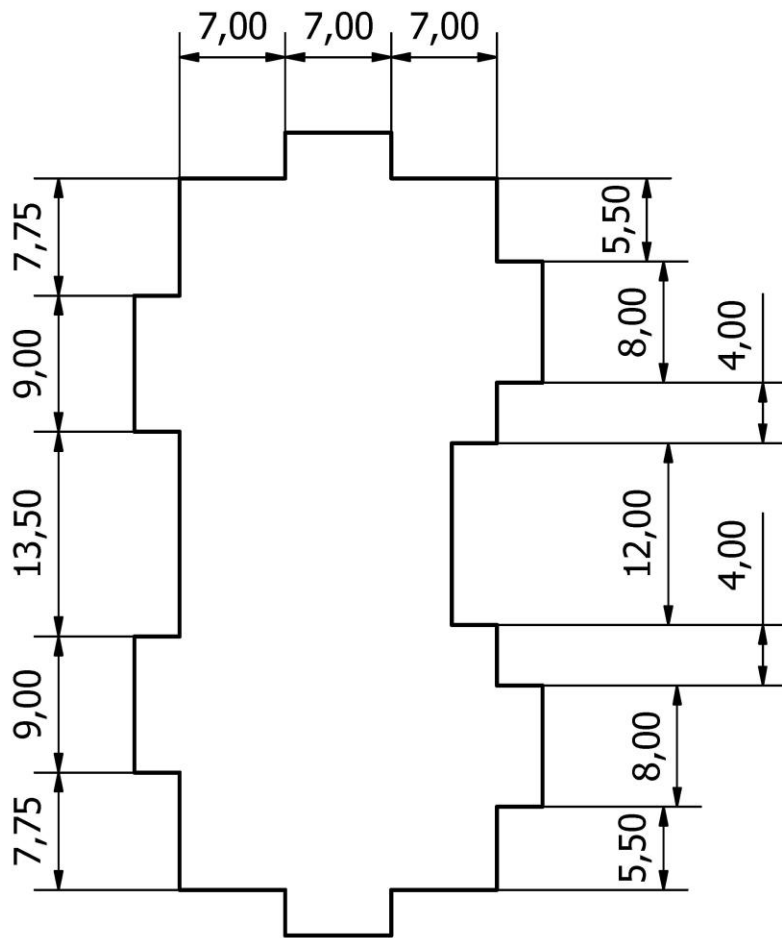
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 17	Edición 1	Hoja 18 / 24



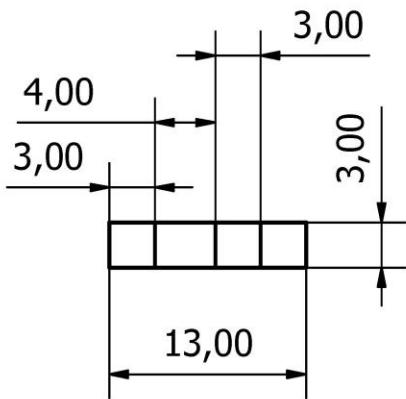
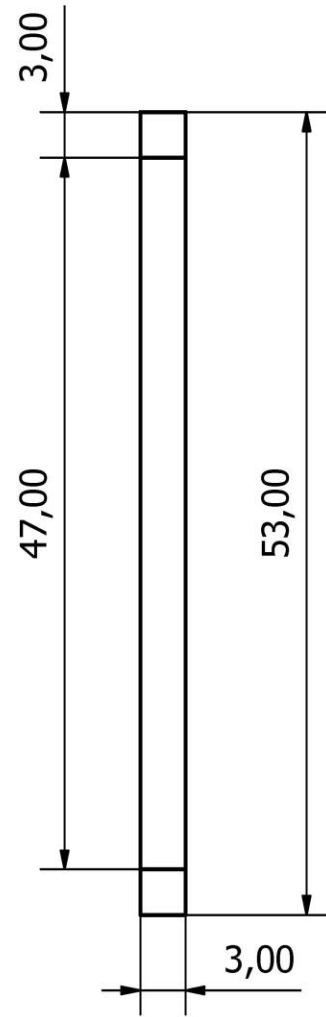
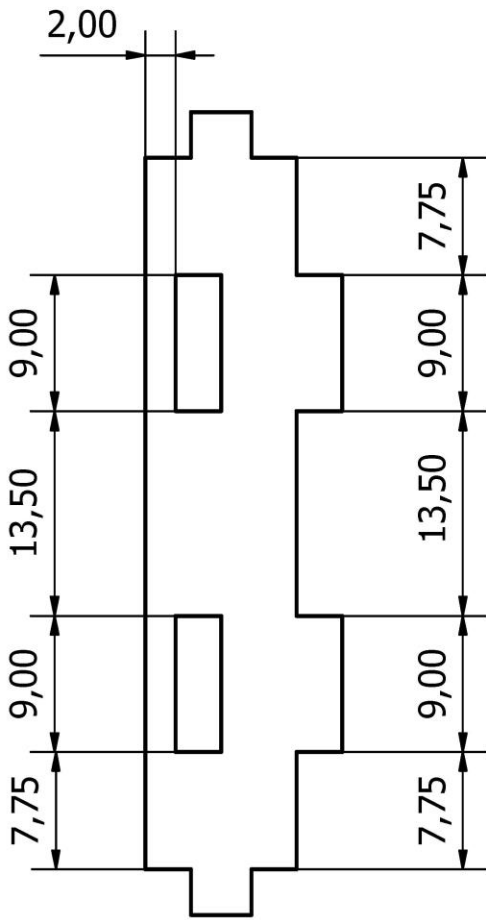
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 18	Edición 1	Hoja 19 / 24



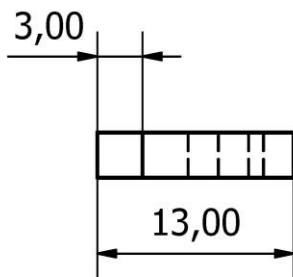
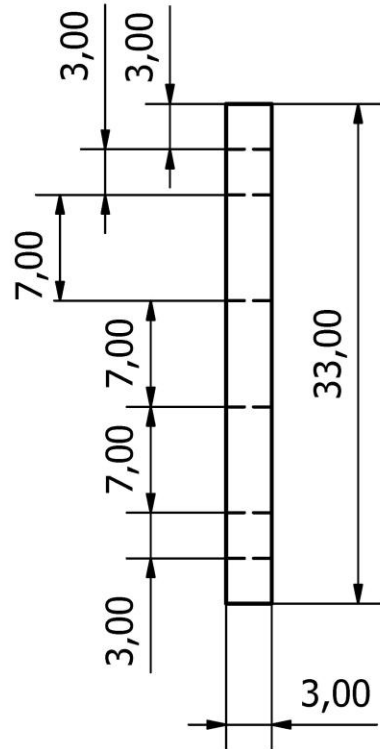
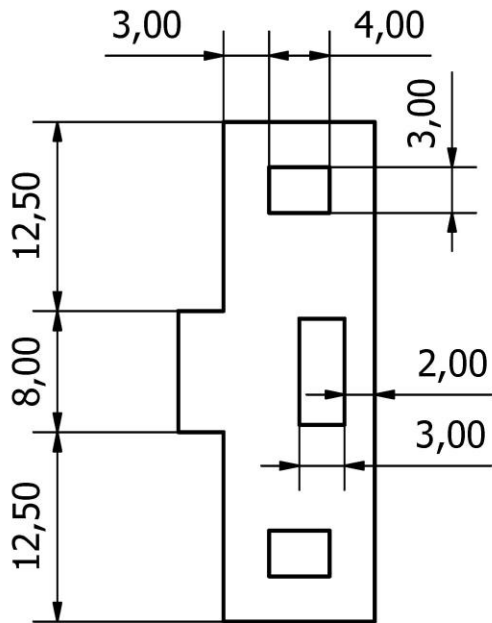
Diseño de Alberto Torres	Escala 1 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 19	Edición 1	Hoja 20 / 24



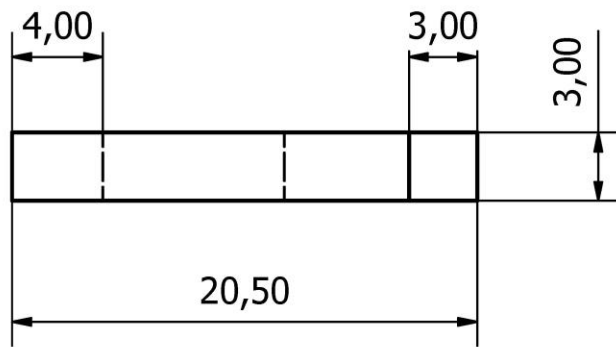
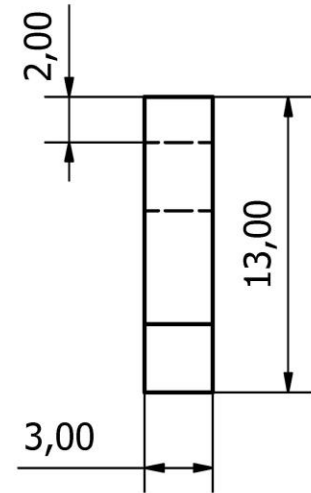
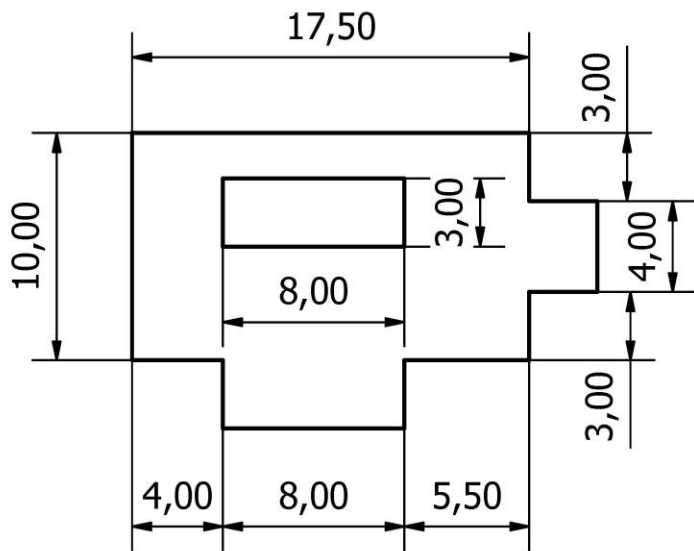
Diseño de Alberto Torres	Escala 2 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 20	Edición 1	Hoja 21 / 24



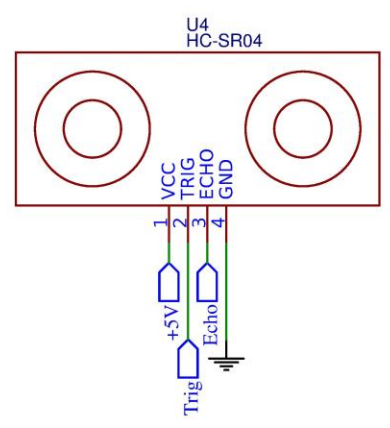
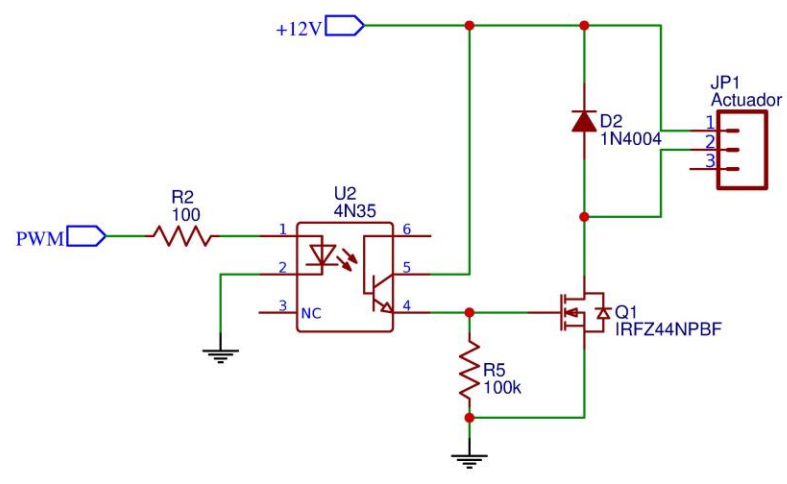
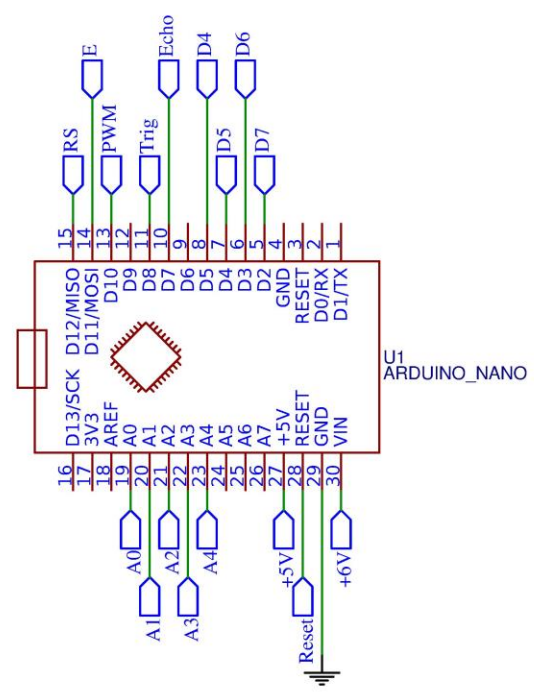
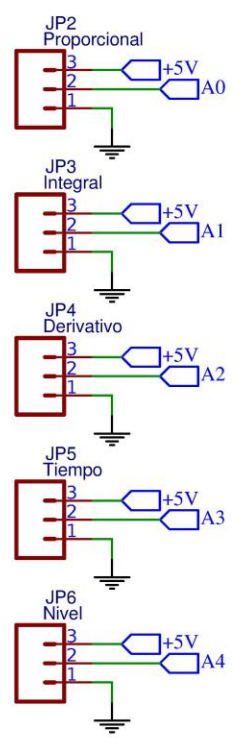
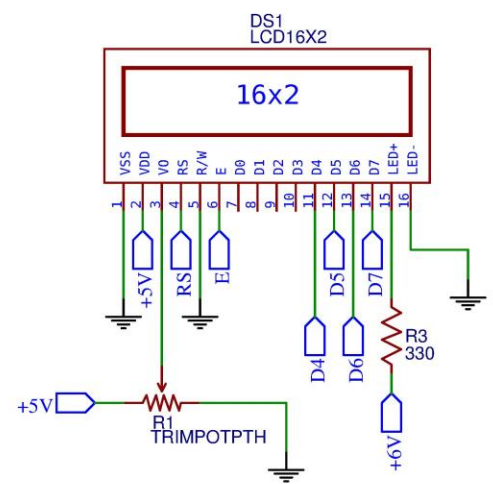
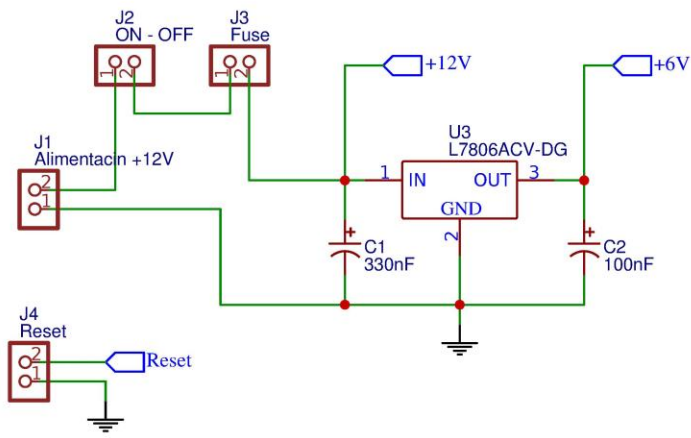
Diseño de Alberto Torres	Escala 2 : 1	Aprobado por	Cantidad 1	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 21	Edición 1	Hoja 22 / 24



Diseño de Alberto Torres	Escala 2 : 1	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental		Sistema Tubo - Esfera			
N° de elemento 22			Edición 1	Hoja 23 / 24	



Diseño de Alberto Torres	Escala 3 : 1	Aprobado por	Cantidad 2	Fecha 30/11/2018	Hoja A4
Universidad Continental			Sistema Tubo - Esfera		
			Nº de elemento 23	Edición 1	Hoja 24 / 24



TITLE: Circuito Electronico		REV: 1.0
Date: 2018-10-11		Sheet: 1/1
EASYEDA V5.7.26		Drawn By: Alberto Torres