



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN

Propuesta tecnológica, previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**“CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO PARA UN SISTEMA TIPO
SISO DE NIVEL DE LÍQUIDO REPRESENTADO EN VARIABLES DE ESTADOS
Y SU COMPARACIÓN CON EL CONTROL PID Y CONTROL POR REDES
NEURONALES ARTIFICIALES”**

AUTOR

JOSÉ SAÚL AGUILAR MALAVÉ

TUTOR

ING. CARLOS ALBERTO SALDAÑA ENDERICA

LA LIBERTAD – ECUADOR

2022

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la vida por haberme permitido tener tan grata experiencia a lo largo de esta carrera, por enseñarme cada día a salir adelante a pesar de las adversidades, que cada obstáculo se puede superar, que una caída no significa un fracaso, y que al final todo sacrificio es recompensado con la satisfacción de haber realizado un buen trabajo alcanzando una meta planteada.

Agradezco infinitamente a mi familia por su apoyo, principalmente a mi madre, que con arduo trabajo y gran sacrificio me forjó desde muy pequeño para tomar las decisiones correctas y seguir por el camino del bien, a mi padre, con sus enseñanzas y experiencias impartidas en su vida me enseñaron el valor de todas las cosas y a apreciar cada momento así se repita un millón de veces.

Agradezco a los docentes de la facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, especialmente al ingeniero Carlos Saldaña, quien fue mi tutor a lo largo del desarrollo de este proyecto, por su apoyo, enseñanzas y consejos, hicieron de este camino algo muy especial que será recordado siempre.

José Saúl Aguilar Malavé

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Mercy Malavé y a mi padre José Aguilar, por haberme inculcado valores desde muy pequeño, a siempre escoger el camino del bien, por su arduo trabajo para que nunca me falte nada, por siempre estar ahí mostrándome el lado positivo de las cosas, hasta el día de hoy sus experiencias vividas y enseñanzas siguen ayudándome a ser una mejor persona, gracias infinitas.

José Saúl Aguilar Malavé

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor de la propuesta tecnológica con título “Control predictivo basado en modelo para un sistema tipo SISO de nivel de líquido representado en variables de estados y su comparación con el control PID y control por Redes Neuronales Artificiales”, presentado por el señor egresado Aguilar Malavé José Saúl, estudiante de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado, es aprobado en todas sus partes.

Particular que informo para los fines consiguientes.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos Alberto Saldaña Enderica', is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a long, sweeping flourish that extends upwards and to the right.

Ing. Carlos Alberto Saldaña Enderica, MSc.

Docente tutor

TRIBUNAL DE GRADO




Ing. Washington Torres Guin, Mgt.
DECANO DE FACULTAD



Ing. José Aquino Sánchez, Mgt.
DIRECTOR DE CARRERA



Ing. Carlos Saldaña Enderica, Mgt.
PROFESOR TUTOR



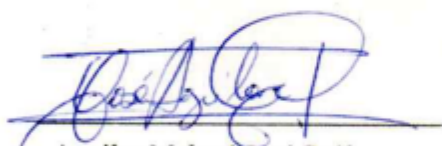
Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Mgt.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ab. Luis Castro Martínez, Mgt.
SECRETARIO GENERAL

DECLARACIÓN DEL AUTOR

El contenido del presente Trabajo de Titulación es de mi responsabilidad; el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena.



Aguilar Malavé José Saúl

RESUMEN

En la actualidad la temática de control automático es considerado como una pieza clave tanto en procesos industriales, así como en la investigación científica, sin embargo, el conocimiento de las técnicas y estrategias de control moderno son opacadas por las estrategias de control clásico utilizados en la mayoría de industrias.

El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un controlador predictivo basado en modelo (MPC) y su comparativa con los algoritmos de control: Proporcional, Integral, Derivativo (PID) y Redes Neuronales Artificiales (RNA). Aplicándolos sobre un sistema de nivel de líquido de una entrada y una salida (SISO) representado en espacio de estados.

Esta propuesta tecnológica tiene como fin analizar las propiedades del comportamiento de un proceso industrial al aplicar tres diferentes técnicas de control. Se parte de la adquisición de datos para la identificación y el modelado del sistema, obteniendo la representación de la planta en espacio de estados, se procede a acoplar los sistemas de control evaluando el desempeño del proceso en estado estable y de esta manera comprender el funcionamiento, ventajas, desventajas y especificaciones técnicas que deben tomarse en consideración al momento de incorporar un controlador a un sistema.

ABSTRACT

In current times, the automatic control is considered the core piece of industrial processes, this is the same situation for scientific research. However, modern knowledge of top of the notch control techniques and strategies tend to be overshadowed by the classical controllers used in the most industries.

The present Project cfocuses on the development of a model-based predictive controller (MPC)and its comparation with Proportional, Integral, Derivative (PID) and Artificial Neural Networks (ANN) controllers through the application of these on a SISO liquid level system represented in space state.

The main purpose of this tchnological proposal is to analyze the behavioral process through the application of three different control techniques. It starts with the data collection process in order to identify and model the system, finding out the representationof the plant in the steady state, consequently, understanding the operation, advantages, and disvantages, as well as the technical specifications, that can be considered when incorporating a controller into a system.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
APROBACIÓN DEL TUTOR	iii
TRIBUNAL DE GRADO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
INDICE GENERAL.....	viii
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xv
INDICE DE ANEXOS	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.5.1 INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA	8
1.5.2 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL	8
1.5.3 INVESTIGACIÓN APLICADA.....	8

1.6 RESULTADOS ESPERADOS	8
CAPÍTULO II.....	9
2.1. MARCO CONTEXTUAL.....	9
2.2 MARCO CONCEPTUAL	10
2.2.1 MODELADO MATEMÁTICO	10
2.2.2 CONTROL AUTOMÁTICO	13
2.2.3 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	23
2.2.4 PROPIEDADES TEÓRICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA A CONTROLAR.....	25
2.3 MARCO TEORICO	26
CAPÍTULO III	28
3.1 COMPONENTES DE LA PROPUESTA	28
3.1.1 COMPONENTES FÍSICOS	28
3.1.2 COMPONENTES LÓGICOS	29
3.2 DISEÑO DE LA PROPUESTA	30
3.2.1 SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES SIGNIFICATIVAS.....	30
3.2.2 MODELADO TEÓRICO DEL SISTEMA	31
.....	36
3.2.3 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN ESPACIO DE ESTADOS DEL SISTEMA FÍSICO DE NIVEL DE LIQUIDO	36
3.2.4 DISEÑO Y DESARROLLO DEL CONTROLADOR PID.....	45
3.2.5 DISEÑO Y DESARROLLO DEL CONTROLADOR MPC.....	57
3.2.6 DISEÑO Y DESARROLLO DEL CONTROLADOR POR RNA	64
CAPÍTULO IV	71

4.1. PRUEBAS	71
4.1.1 EJECUCIÓN DEL CONTROL PID	71
4.1.2 EJECUCIÓN DEL CONTROL PID CON EFECTO WINDUP	72
4.1.3 EJECUCIÓN DEL CONTROLADOR MPC	73
4.1.4 EJECUCIÓN DEL CONTROLADOR POR RNA	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	90

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DEL PROCESO DE MODELADO MATEMÁTICO [21] ..	11
FIGURA 2. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO [23]	14
FIGURA 3. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO [24].....	14
FIGURA 4. METODOLOGÍA DE UN CONTROLADOR MPC [7]	15
FIGURA 5. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONTROLADOR MPC [7]	17
FIGURA 6. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONTROLADOR PID [23]	21
FIGURA 7. SECCIONES DE UNA RED NEURONAL [32]	22
FIGURA 8. SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO.	24
FIGURA 9. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO.	24
FIGURA 10. PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO Y SUS VARIABLES.....	30
FIGURA 11. COMPARATIVA DE LOS MODELADOS MATEMÁTICOS NO LINEAL (IZQUIERDA) Y LINEALIZADO (DERECHA)	36
FIGURA 12. FILTRO PASA BAJO APLICADO A UNA SEÑAL.....	38
FIGURA 13. ESQUEMA GRAFICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA PLANTA.	39
FIGURA 14. LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO.....	40
FIGURA 15. DIAGRAMA SISO EN LAZO ABIERTO DEL PROCESO.....	40
FIGURA 16. COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA EN LAZO ABIERTO.	41
FIGURA 17. SEÑALES EN RESPUESTA DE LA PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO.	42
FIGURA 18. SEÑAL DE FORMA SIGMOIDAL [23]	46

FIGURA 19. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDOS. ...	47
FIGURA 20. MÉTODO DE OSCILACIÓN DE ZIEGLER-NICHOLS [23]	47
FIGURA 21. CONFIGURACIÓN DEL MÉTODO DE LA OSCILACIÓN DE ZIEGLER-NICHOLS.....	48
FIGURA 22. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AL AUMENTAR LA GANANCIA PROPORCIONAL.	49
FIGURA 23. CONFIGURACIÓN PARA SINTONIZACIÓN DE CONTROL PID ...	49
FIGURA 24. COMPORTAMIENTO DE LAS ACCIONES PID EN UN SISTEMA SATURADO [51].....	51
FIGURA 25. EFECTO WINDUP [28].....	52
FIGURA 26. ESQUEMA DE MECANISMO ANTI-WINDUP DE DESCARGA DE ACCIÓN INTEGRAL [51].	52
FIGURA 27. CONTROLADOR PID CON ANTI-WINDUP	53
FIGURA 28. SISTEMA UTILIZADO PARA PRUEBAS DEL CONTROLADOR PID.	54
FIGURA 29. ALTURA MEDIDA DURANTE LA EJECUCIÓN DEL PROCESO. ...	54
FIGURA 30. COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DE CONTROL EN LA APERTURA Y CIERRE DE VÁLVULA.	55
FIGURA 31. CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO, ACOPLADA A UN CONTROLADOR PID	56
FIGURA 32. BLOQUE CONTROLADOR MPC.....	57
FIGURA 33. CONFIGURACIÓN PARA LA LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA POR PARTE DEL CONTROLADOR.....	58
FIGURA 34. ESTRUCTURA DE CONTROL MPC.....	58
FIGURA 35. SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA LINEALIZADAS POR EL CONTROLADOR MPC.....	59

FIGURA 36. SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA APLICANDO AJUSTES EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.....	60
FIGURA 37. SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA APLICANDO UNA RESTRICCIÓN DE AMPLITUD A LA ENTRADA.	62
FIGURA 38. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL MPC	63
FIGURA 39. CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO ACOPLADA A UN SISTEMA DE CONTROL MPC	64
FIGURA 40. DIAGRAMA DE BLOQUE PARA EL MODELADO DEL SISTEMA	65
FIGURA 41. MODELO ARX PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS [52]	65
FIGURA 42. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RNA.....	67
FIGURA 43. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL POR RNA [10].....	68
FIGURA 44. SISTEMA DE CONTROL RNA PARA SIMULACIÓN.....	68
FIGURA 45. COMPORTAMIENTO IRREGULAR DE LA ENTRADA EN RELACIÓN A LA SALIDA EN EL SISTEMA DE CONTROL POR RNA.	69
FIGURA 46. COMPORTAMIENTO CORREGIDO DEL SISTEMA DE CONTROL POR RNA.	69
FIGURA 47. CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLANTA DE NIVEL DE LÍQUIDO ACOPLADA A UN CONTROL POR RNA.....	70
FIGURA 48. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA SALIDA DEL SISTEMA UTILIZANDO UN CONTROLADOR PID	71
FIGURA 49. COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL CONTROLADOR PID..	72
FIGURA 50. COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA CON EFECTO WINDUP....	72
FIGURA 51. SEÑAL DE CONTROL RETRASADA POR EFECTO WINDUP	73
FIGURA 52. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA SALIDA DEL SISTEMA UTILIZANDO UN CONTROLADOR MPC.	73
FIGURA 53. COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL CONTROLADOR MPC	74

FIGURA 54. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA SALIDA DEL SISTEMA UTILIZANDO UN CONTROLADOR POR RNA.....	75
FIGURA 55. COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL CONTROLADOR MPC	75
FIGURA 56. SEÑALES DE RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE LA APLICACION DE LOS TRES TIPOS DE CONTROL	76
FIGURA 57. SEÑALES APLICADAS AL SISTEMA POR LOS TRES TIPOS DE CONTROL	77
FIGURA 58. SEÑALES DE ERROR OBTENIDAS EN LA EJECUCIÓN DEL SISTEMA EN CONJUNTO DE LOS CONTROLADORES PID, MPC Y RNA.....	78
FIGURA 59. TOOLBOX SYSTEM IDENTIFICATION.....	92
FIGURA 60. PID TUNER.....	93
FIGURA 61. MPC TOOLBOX.....	93
FIGURA 62. NFTOOL.....	94
FIGURA 63. ENTRENAMIENTO DE RED NEURONAL.....	94

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. BLOQUES A UTILIZAR EN EL MODELO DEL SISTEMA EN SIMULINK.....	37
TABLA 2. VALORES DE APROXIMACIÓN DE CADA MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS.....	42
TABLA 3. COMPORTAMIENTO ERRÓNEO DE LA VÁLVULA EN EL SISTEMA.....	50
TABLA 4. COEFICIENTES DE CONTROL PID OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE PRUEBA Y ERROR.....	53
TABLA 5. COEFICIENTES OBTENIDOS EN COMPLEMENTO DE LA HERRAMIENTA PID TUNER.....	55
TABLA 6. ASIGNACIÓN DE PESO A LA SEÑAL DE CONTROL.....	62
TABLA 7. ASIGNACIÓN DE PESO A LA SEÑAL DE CONTROL.....	63
TABLA 8. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL CONTROLADOR MPC.....	64
TABLA 9. ENTRADAS Y OBJETIVO PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL.....	66
TABLA 10. PARÁMETROS DE ENTRENAMIENTO DE LA RNA.....	67
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LA DINÁMICA DE LA PLANTA PARA CADA CONTROLADOR.....	79
TABLA 12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE BOMBA MAGNÉTICA MKII.....	90
TABLA 13. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ARDUINO MEGA-2560.....	90
TABLA 14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SERVOMOTOR MG-995.....	91
TABLA 15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SENSOR ULTRASÓNICO HC-SR04.....	91

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BOMBA MKII	90
ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ARDUINO MEGA-2560.	90
ANEXO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SERVOMOTOR MG-995	91
ANEXO 4: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SENSOR DE DISTANCIA HC-SR04	91
ANEXO 5: AMBIENTE DE TRABAJO TOOLBOX SYSTEM IDENTIFICATION	92
ANEXO 6: AMBIENTE DE TRABAJO PID TUNER	92
.....	92
ANEXO 7: AMBIENTE DE TRABAJO MPC TOOLBOX.....	93
ANEXO 8: AMBIENTE DE TRABAJO MPC TOOLBOX.....	93
ANEXO 9: ENTRENAMIENTO DE RED NEURONAL.....	94

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la aplicación de técnicas de control automático en procesos industriales es descrita como una herramienta cuya importancia radica en los beneficios directos e indirectos que provee en un área de producción, donde se destacan las tareas y cálculos realizados por computadoras, controladores y/o mecanismos especializados, con el objetivo de cumplir con los requerimientos de un sistema para asegurar la calidad en el producto final [1].

El desarrollo e implementación de algoritmos de control es un tema ampliamente estudiado tanto en el campo de la industria, como de la investigación científica, debido a la demanda de optimizar constantemente los procesos en relación a los continuos avances tecnológicos y surgimiento de nuevos sistemas robustos, estos estudios realizados dan origen a elementos pertenecientes a la teoría de control, la cual se divide en dos grupos: Teoría de control clásica y Teoría de control moderno.

Los controladores clásicos son mayormente usados por las industrias debido a la facilidad de implementación y configuración que poseen, sin embargo, si el proceso resultara tener propiedades que incrementan la complejidad del sistema, se opta por aplicar controladores más robustos capaces de ejecutar el proceso en su totalidad dando apertura a la utilización de la teoría de control moderno, no obstante, la mayoría de estos controladores son desconocidos como consecuencia de su mínimo uso sobre plantas de producción industrial. Por tal motivo, es necesario introducir la aplicación de controladores modernos sobre procesos ya conocidos. En la presente propuesta, se utiliza un sistema de nivel de líquido de una entrada y una salida (SISO) para la implementación de tres tipos de algoritmos de control: Control Proporcional, Integral, Derivativo (PID), Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) y Control por Redes Neuronales Artificiales (RNA). La estrategia PID forma parte de los controladores clásicos, mientras que MPC y RNA representan a los controladores modernos.

El trabajo de titulación está constituido por cuatro capítulos:

El primer capítulo detalla los aspectos generales del proyecto como antecedentes, objetivos, descripción, justificación y la metodología empleada. En el segundo capítulo se aprecia el fundamento teórico que abarca marco contextual, marco conceptual y marco teórico, en esta sección se dan a conocer las temáticas en las cuales se basara el desarrollo

de la propuesta. El capítulo III corresponde a la especificación de los componentes físicos y lógicos utilizados, además de la explicación del desarrollo de la propuesta en cada una de sus fases. Por último en el capítulo IV se presentan los resultados y comparativa del sistema acoplado a los tres algoritmos de control, definiendo características como ventajas, desventajas, recursos necesarios y especificaciones técnicas para su uso, finalizando con las conclusiones, recomendaciones, y bibliografía.

CAPÍTULO I

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, la temática de control se presenta como un componente valioso y crítico dentro de la industria 4.0 debido a la necesidad que tienen ciertos elementos donde juegan un papel de vital importancia para el desempeño de un proceso [2]. Para llegar a ser considerado tan importante, el control a tenido que pasar por una gran variedad de estudios, técnicas de diseño, y optimización de los procesos de manufactura, distinguiendo ciertos comportamientos de las máquinas, como velocidad variable y baja estabilidad. Estos aspectos se consideran un problema bastante grave que atrae a un gran número de investigadores estableciendo las bases para la teoría de control.

Hasta inicios del siglo XX, las únicas herramientas disponibles para el análisis de control eran el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias junto a criterios algebraicos [3], con esto se debía obtener un modelo matemático, que supone un arduo trabajo, los criterios de la época no ofrecen información sobre como optimizar la estabilidad de un sistema, a consecuencia de esto la ingeniería de control empieza a buscar las soluciones. Estos estudios se conocen como la teoría clásica de control, donde su principal característica es el uso de herramientas matemáticas como la transformada de Laplace y de Fourier, así como la descripción externa de los sistemas.

Las primeras aplicaciones de control de temperatura en la industria son de tipo ON/OFF [4] mediante mecanismos simples, lo cual fue insuficiente para las exigencias dadas en los procesos industriales. Por consecuente, se plantean nuevos elementos capaces de solventar estas falencias utilizando reguladores integrales y proporcionales que al incorporar la acción derivativa dan origen al regulador PID de 3 términos (Proporcional, Integral y Derivativo), se entregan como resultados de investigaciones, fórmulas empíricas para sintonizar el PID a un proceso [5]. Los coeficientes de las acciones proporcional, integral y derivada se los pueden desarrollar de manera experimental desde el proceso que se requiere controlar.

Este tipo de control está vigente y profundamente usado en el ámbito del control de procesos industriales.

Por otro lado, cuando se realiza una observación a los elementos que conforman los controladores modernos, se puede encontrar una gran variedad de sistemas que pueden ser aplicados, uno puede ser más conveniente que otro, en este caso, el estudio se orienta hacia los controladores MPC (control predictivo basado en modelo) y RNA (redes neuronales artificiales).

Los sistemas MPC surgen a partir del concepto del uso de una técnica para solucionar un problema de control en lazo abierto [6], con el objetivo de sintetizar un controlador realimentado, hoy en día se considera que el MPC es más popular en el área de control de procesos industriales, a causa de la simplicidad del algoritmo y su aplicación con modelos en base a respuesta al escalón, considerado más intuitivo. Este control posee varias aplicaciones, donde destacan la industria petroquímica, manipuladores de robots, tratamiento de aguas, industria del papel, entre otras [7]. Gran parte estas aplicaciones son multivariadas y poseen restricciones, algunas de ellas presentando no linealidad. El incremento de interés en el control MPC provoca que la comunidad académica y científica trate de incluir características de robustez para garantizar la estabilidad y desempeño en sus plantas, sin embargo, existen aspectos teóricos que aún siguen siendo investigados para determinar su mejor aplicación [8].

De la misma manera las redes neuronales se potencian a partir de la creación del perceptrón, el cual toma varias entradas binarias y produce una sola salida[9], para su cálculo se introduce el concepto de pesos, un número real que determina la importancia de la entrada con la salida. Más adelante se introduce un nuevo tipo de neuronas llamadas “Sigmoides” su principal característica son los valores de sus entradas que a diferencia de ser ceros o unos como su predecesora, sean de valores reales. Como se puede apreciar, más adelante en nuestra área de conocimiento, algunas configuraciones de las redes neuronales toman un papel más enfocado a control, como sucede con el algoritmo de backpropagation, introduciendo el término “entrenamiento supervisado” [10], calculando el error obtenido en la salida.

Actualmente, las redes neuronales son una temática de estudio recurrente para la ingeniería, presentes en varios elementos de la cotidianidad, como en el área de la industria e investigación, varias de las aplicaciones que se les dan a estos sistemas cumplen las mismas funciones de diversos sistemas de control modernos, por lo que

pueden ser replicados en base al entrenamiento de RNA, lo que supone una enorme optimización en gran cantidad procesos, superando las barreras presentes hoy en día, en compañía de los avances científicos y tecnológicos [11].

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como fin, construir un sistema de control predictivo basado en modelo para analizar y comparar dos tipos de controles sobre un sistema de nivel de líquido tipo SISO aplicado a la industria, y a la investigación, los sistemas de control a comparar son:

- Control PID (Proporcional, Integral Derivativo)
- Control RNA (Redes Neuronales Artificiales)

Los cuales pueden ser aplicados a cualquier tipo de proceso, sin embargo, cada uno de ellos presentan propiedades de complejidad considerable que deben estudiarse para entender su funcionalidad al ser acoplados a un sistema de nivel de líquido tipo SISO representada mediante variables de estado.

El estudio parte con la identificación del sistema, para luego desarrollar teóricamente el modelado matemático por variables de estado, continuando con su comparación, análisis e implementación del control MPC, PID y RNA.

Se describe de manera sistemática los elementos que componen la planta de nivel de líquidos sobre la que se aplica el control.

El trabajo de investigación se ve orientado en gran parte a identificar las características y comportamiento de estos sistemas de control al ser aplicados a una planta real como a los modelos matemáticos, resaltando los aspectos que deben conocerse para obtener mejores resultados en cuanto a las propiedades y características de estabilidad de un sistema, adicional, con ayuda de simuladores se evalúa los controles a diseñar sobre los modelos construidos. Con esto se puede observar varios resultados que en comparativa podrán demostrar las características individuales de cada algoritmo de control implementado sobre un proceso.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar un sistema de control MPC para un sistema de nivel de líquido representado en variables de estado y compararlo con el control PID y el control por redes neuronales artificiales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar y aplicar un sistema de control predictivo basado en modelo sobre un sistema de nivel de líquido tipo SISO, para determinar las propiedades del comportamiento del proceso en estado estable.
- Diseñar un sistema de control PID, para su aplicación en el proceso y el análisis de las variables a controlar.
- Acoplar un sistema de control por redes neuronales artificiales al proceso.
- Comparar los controles MPC, PID, y RNA sobre un sistema de nivel de líquido.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En industrias como, la metalurgia, la pintura, alimentos, tratamiento de aguas, petroquímicas y farmacéuticas, el control y medición del nivel de líquido es esencial [12], debido a que el contenido de los productos debe ser exacto, de lo contrario, al no tener la medida correcta se pierde credibilidad, afectando la economía de cualquier empresa.

Dentro de la industria, controlar el nivel de líquidos se considera como un problema bastante común, dado que este sistema presenta un modelo matemático no lineal, por esta razón, la aplicación de un sistema de control para el nivel de líquido es necesario en la mayoría de los procesos industriales. Generalmente se utilizan controladores PID o PI para poder cubrir este requerimiento. Sin embargo, a causa de la complejidad del control

debido a las no linealidades del proceso, las técnicas convencionales como el PID o PI no son adecuadas [13].

Entre las técnicas más avanzadas dentro de los sistemas de control de nivel se encuentra el MPC, destacándose por funciones como mejorar el desempeño del control del proceso industrial, el establecimiento de restricciones y su aplicación sobre sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) [14]. La importancia del sistema MPC reside en su desempeño frente a retardos que aparecen en un proceso, pues una buena predicción optimiza el rendimiento del controlador cuando se presentan retardos, los cuales son habituales dentro de los procesos industriales. Se considera que el control predictivo constituye una poderosa herramienta, dado que acepta cualquier tipo de modelo o función, convirtiéndose en una metodología que puede reflejar múltiples criterios de funcionamiento, relevantes en la industria de procesos. Algunas de sus aplicaciones son: generadores de vapor, aplicaciones en la industria del cemento, columnas de destilación, anestesia clínica y robótica.

Por otro lado, las redes neuronales artificiales se presentan acompañadas de una serie de beneficios, en las que se incluyen su capacidad de aprendizaje y gran tolerancia a fallos. Estas características las vuelven muy adecuadas para aplicarse a control. Adicionalmente, para el aprendizaje de una red neuronal, solo es necesario conocer la entrada y salida del sistema, de esta manera, conocer la estructura del sistema completo deja de ser indispensable, además puede llegar a ser aplicado en un sistema con perturbaciones. Dentro de las aplicaciones de las redes neuronales se pueden encontrar: Análisis y procesado de señales, control de procesos, reconocimiento de imágenes, diagnósticos médicos, entre otros.

1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Investigación Descriptiva

En el presente proyecto se requiere describir los sistemas de control PID, MPC y RNA haciendo énfasis de todos componentes teóricos/prácticos y su comportamiento en base a un análisis profundo realizado a su intervención, al ser acoplado en una planta de nivel.

1.5.2 Investigación Documental

Tomando como base las investigaciones y resultados propuestos relacionados con la teoría del control clásico y moderno, apoyar el desarrollo de este proyecto con la adquisición de información sobre métodos de control, así como aplicaciones de los mismos a diferentes áreas profesionales.

1.5.3 Investigación Aplicada

Este proyecto busca analizar el comportamiento de la aplicación de los conocimientos de sistemas de control en áreas científicas o industriales, para este caso, acoplándolo a una planta de nivel SISO representada en variables de estados.

1.6 RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados previstos tras el desarrollo de este proyecto son los siguientes:

- Implementación del algoritmo de control PID sobre el sistema de nivel de líquido SISO y obtención de información sobre el comportamiento del sistema durante la ejecución del proceso.
- Ejecución del algoritmo de control MPC sobre el sistema planteado en esta propuesta, determinando las propiedades del sistema tanto en su estado transitorio, así como en estado estable.
- Aplicación de la teoría de control moderno a través del acoplamiento de un controlador por RNA a la planta de nivel de líquido, definiendo el desarrollo del algoritmo y comportamiento mediante la ejecución y análisis del proceso.

- Comparación de las propiedades de los tres algoritmos de control obtenidas mediante el análisis de la ejecución del proceso, definiendo el controlador con mejores características para esta propuesta y a la vez determinar su viabilidad al implementarse en ambientes industriales.

CAPÍTULO II

2.1. MARCO CONTEXTUAL

Los sistemas de control automático en un proceso industrial, constituyen una mejora en la cadena de producción, puesto a que el uso de sistemas automatizados no es visto como un lujo sino como una necesidad [15], sin embargo, aunque es considerado como un fenómeno mundial en la industria 4.0, solo cuatro naciones (China, India, Japón y Estados Unidos) representan poco más de la mitad de salarios y empleados asociados a las actividades automatizables [16]. Estudios en américa latina determinan que el 60% de las actividades realizadas en la industria son susceptibles de automatizar, y de la misma forma, en Ecuador aproximadamente el 49% de los procesos manufactureros pueden ser reemplazados por alta tecnología [17]. En Latinoamérica la automatización que presentan las industrias en sus procesos son: en accionamiento manual 48%, semiautomático 27%, automático 18%, y computarizado con 7%, dando a conocer el bajo nivel de aplicaciones tecnológicas que poseen la PYMES [18]. Por consecuente, si la automatización no tiene relevancia en el campo de la industria, los sistemas de control aplicados en estos procesos, aparte de tener una complejidad considerablemente baja no llegan a ser los adecuados para cumplir con las exigencias de la producción, dando como resultado un desconocimiento sobre la teoría de control y su impacto en la industria actual.

Empresas de renombre en Ecuador tratan de transformar su modelo de negocios mediante el uso de la automatización, trayendo múltiples beneficios a la compañía, debido a esto, la investigación de sistemas de control modernos aplicados a procesos industriales se ha vuelto un enfoque primordial de estudio en universidades e institutos del país [19], siendo la “Universidad Estatal Península de Santa Elena” la única institución educativa en la provincia de Santa Elena que promueve el estudio de los sistemas de control a través de investigaciones y aplicaciones industriales.

El diseño, desarrollo, e implementación de un sistema de control MPC para un sistema de nivel de líquidos y su comparación con el control PID y control por redes neuronales artificiales, tiene el fin de ampliar el conocimiento del uso de la teoría del control automático, a través del análisis de un proceso en aplicaciones relacionadas al nivel de líquidos, en las áreas de la industria y de la investigación.

Se utiliza un sistema de nivel de líquido, el cual es un sistema con una sola entrada y salida única (SISO), como planta a controlar, se realiza el modelado matemático con el objetivo de conocer el comportamiento del sistema, también se desarrolla de manera teórica los algoritmos de control (PID – MPC – RNA), para su respectiva comparación al acoplarlos al sistema de nivel, para después analizar los resultados obtenidos.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Modelado matemático

El modelado matemático es una herramienta que se dispone en la actualidad para analizar y predecir el comportamiento de un sistema físico, en forma de términos matemáticos, ecuaciones diferenciales, formulas o gráficos. Por tanto, un modelo es una representación de un fenómeno físico del que se conocen sus procesos inmersos y las relaciones entre ellos, lo que facilita el conocimiento de las ecuaciones que lo describen [20].

Debido a la naturaleza de un fenómeno físico, de este se pueden construir gran cantidad de modelos matemáticos diferentes entre sí, donde la efectividad de dichos modelados dependerá del conocimiento de los procesos a representar, por lo que es fundamental conocer las etapas de la construcción de un modelado matemático (ver Figura 1), que se dividen en:

- Estudio de la situación real
- Elaboración del modelo matemático
- Validación del modelo
- Solución del modelo

Los cuales se representan y describen a continuación:

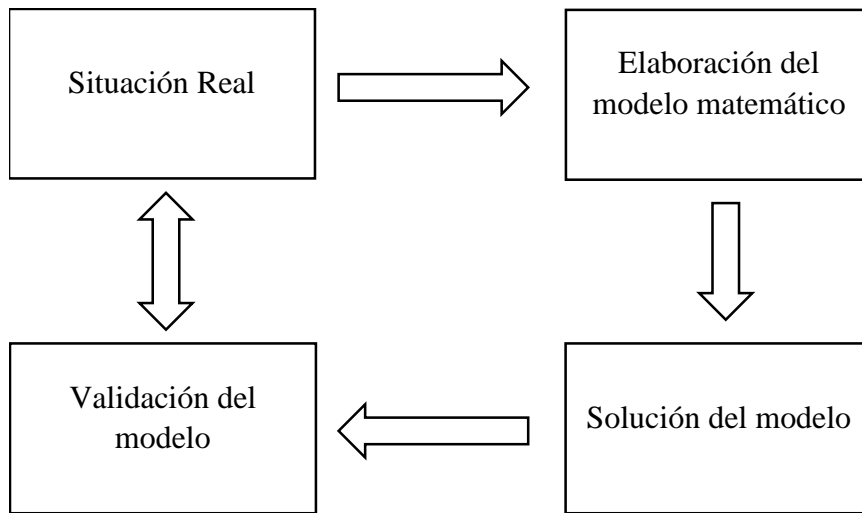


Figura 1. Esquema del proceso de modelado matemático [21]

- **Estudio de situación real:** Se plantea una problemática en base a un fenómeno físico de donde se desea obtener más información, identificando de forma clara las variables a emplear y las leyes que lo rigen, con el fin de entender el elemento a modelar [21].
- **Elaboración del modelo matemático:** Para poder describir matemáticamente un fenómeno real, es necesario realizar estudios de las propiedades en el mismo, que incluyen tanto el análisis de componentes, así como la selección de la representación más importante y sencilla que describa proceso. La construcción de esta representación muchas veces necesita basarse en modelos ya existentes, donde también interviene el modelado de idealizaciones o abstracciones del fenómeno.
- **Solución del modelo:** La forma en la que se expresa un modelo matemático varía dependiendo las propiedades del proceso, están las más sencillas representadas directamente a través de funciones, y otras en las que se deberá desarrollar el modelo a través de métodos matemáticos para llegar a una función o expresión que describa el comportamiento del problema planteado desde un inicio.
- **Validación del modelo:** Esta sección se encarga de validar el modelo matemático mediante la comparación del comportamiento expresado a través del modelado matemático con información real del fenómeno físico planteado, de esta manera

se deduce la fiabilidad de la representación, además se debe considerar el grado de aceptación que tiene un modelado, de lo contrario se procede a la revisión de las etapas anteriores.

En el modelado matemático de un proceso físico existen técnicas para la construcción de un modelo, dependiendo de las características externas e internas del sistema a modelar, estas técnicas se dividen en dos grupos [21]:

- **Técnicas de representación externa:** son técnicas que se basan en la representación de un fenómeno mediante una función de transferencia, enfocándose exclusivamente en las entradas y salidas del sistema, se pueden aplicar a sistemas lineales e invariantes en el tiempo, sin embargo, su aplicación está orientada en mayor parte a sistemas SISO los cuales solamente poseen una variable de entrada y una variable de salida, mientras que para sistemas MIMO que se componen de múltiples entradas y múltiples salidas, se considera no adecuado.
- **Técnicas de representación interna:** se les conoce de mejor manera como modelado de sistemas en el espacio de estados, son expresiones algebraicas que permiten representar tanto sistemas SISO, así como MIMO, se caracterizan por describir el comportamiento de un fenómeno en forma matricial, donde las dimensiones de la matriz dependerán de las variables que componen al sistema.

Para comprender los elementos que componen el modelado en espacio de estados se presentan los siguientes términos:

- **Estado:** Se define estado como un conjunto de variables conocidas que, junto con una entrada determinada, determinan totalmente el comportamiento del sistema.
- **Variable de estado:** Se define de esta forma a las variables que otorgan el estado al sistema, el número de variables de estado utilizadas está dado en relación al orden del sistema, formando de esta manera un vector de estado conocido como $x(t)$, expresado a continuación.

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde n es el número de componentes o variables de estado del sistema.

Conociendo los elementos que componen este tipo de modelado, se construye la expresión que representa al sistema, compuesta de dos ecuaciones matriciales: la ecuación de estado y la ecuación de salida, representadas respectivamente:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3)$$

Donde:

A: matriz de estado con dimensiones $(n \times n)$

B: matriz de entrada con dimensiones $(n \times 1)$

C: matriz de salida con dimensiones $(1 \times n)$

$x(t)$: Variable de estado

$y(t)$: Variable de salida del sistema

2.2.2 Control automático

El control automático en términos generales, se define como la obtención y conservación de un valor deseado de una variable en un proceso [1]. Para que exista control en una planta, esta debe componerse de un conjunto de elementos físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que actúen automáticamente, sin intervención de agentes externos, además de corregir errores que se presenten en la ejecución del proceso, a este conjunto de elementos se lo denomina como sistema de control, y se implementan en una gran cantidad de campos tecnológicos y científicos, desempeñando un papel de vital importancia para las actividades industriales e investigativas en la actualidad [22].

Para poder aplicar control a un proceso, se utilizan configuraciones específicas en la construcción de sistemas automáticos denominadas estrategias de control, estas se dividen en:

- **Sistemas de control de lazo abierto:** Un sistema de lazo abierto como se observa en la Figura 2, es una estrategia de control que define los sistemas donde la precisión del valor deseado en la salida depende netamente de la calibración de elementos como actuadores y reguladores.

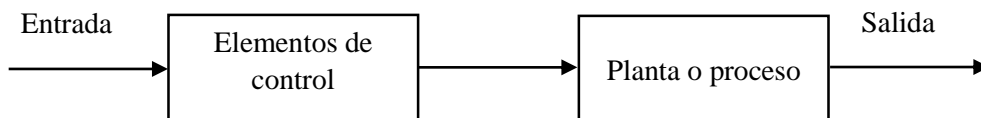


Figura 2. Diagrama de un sistema de control de lazo abierto [23]

- **Sistema de control de lazo cerrado:** Es otra estrategia de control donde se introduce el concepto de realimentación (ver Figura 3), la acción de control depende de la salida del proceso, a esta se la compara con una señal de referencia a través de un sensor, de esta manera el valor de la variable se puede conocer en todo momento [24].

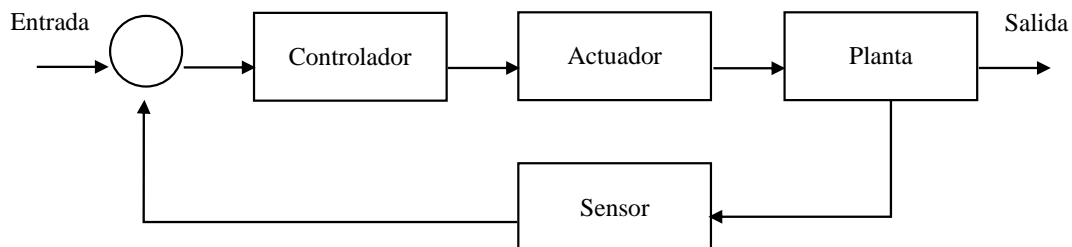


Figura 3. Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado [24]

La principal diferencia entre ambas estrategias de control, radica en la capacidad que se obtiene de monitorear constantemente el comportamiento de la salida en los sistemas de lazo cerrado, mientras que, en los sistemas de lazo abierto no existe un elemento que permita conocer el estado de la variable de forma continua.

En los procesos de control automático se aplican diversos algoritmos de control cuyo objetivo es complementar y optimizar una función específica, estos componentes se acoplan dependiendo el sistema que se requiere controlar.

Control MPC

El control predictivo basado en modelo, también llamado MPC por sus siglas en inglés, es un algoritmo de control moderno utilizado frecuentemente en el sector industrial, su funcionamiento consiste en hallar una trayectoria futura de la variable manipulada, se caracteriza por utilizar una construcción flexible de trabajo en lugar de designar una estrategia de control específica, esto permite el uso de modelos matemáticos de un proceso para predecir las salidas futuras del sistema, con las cuales se busca estabilizar y optimizar acciones de control futuras [25]. Las características de este algoritmo consisten en: utilizar un modelo matemático del proceso en conjunto con los valores de entradas y salidas del sistema conocidas hasta ese instante, para predecir salidas futuras a lo largo de un horizonte de predicción, realizar un cálculo de una secuencia de control para minimizar una función objetivo y emplear una metodología de horizonte recesivo, el cual tiene la función de generar un horizonte de predicción que se desplace hacia el futuro con el fin de aplicar una señal de control para un instante anterior.

De manera general este proceso de control puede visualizarse de la siguiente manera:

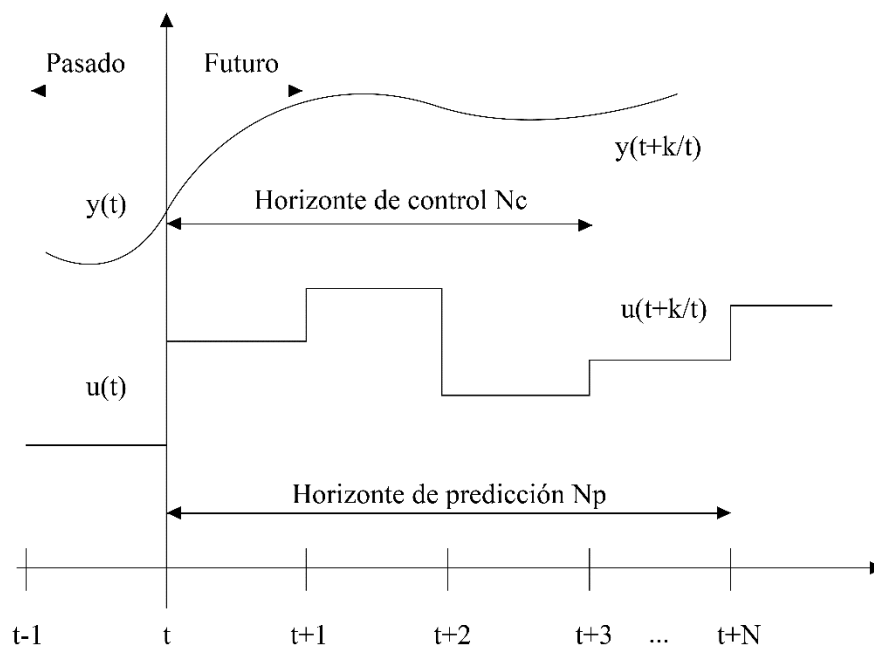


Figura 4. Metodología de un controlador MPC [7]

En la Figura 4, se observa la gráfica que describe la metodología de un sistema de control MPC, el instante de tiempo (t) divide a la gráfica en una sección de tiempo pasado y otra en futuro, que se componen de los siguientes términos:

- $y(t)$ = Salida medida
- $y\left(t + \frac{k}{t}\right)$ = Salida predicha
- $u(t)$ = Entrada de control pasada
- $u\left(t + \frac{k}{t}\right)$ = Entrada de control predicha
- Nc = Horizonte de control
- Np = Horizonte de predicción

En esta representación se puede determinar el comportamiento del algoritmo de control. En cada instante de tiempo (t) se predicen las salidas del sistema sobre un horizonte de tiempo. La señal $y\left(t + \frac{k}{t}\right)$ indica los valores futuros de la salida y el valor Np se conoce como horizonte de predicción. La predicción se realiza mediante un modelo matemático acoplado en la estructura de control, esta predicción depende de las entradas y las salidas pasadas, pero también del escenario de control futuro; es decir, las acciones de se aplican desde el instante de tiempo t en adelante [26].

La estructura del controlador está compuesta por dos componentes principales (ver Figura 5), estos son el modelo matemático y el optimizador, en este último es donde se aplican criterios de rendimiento al comparar resultados de predicción mediante la función de coste y posteriormente escogiendo la mejor señal de control.

Esquemáticamente un sistema en el que interviene un controlador MPC puede representarse de la siguiente manera.

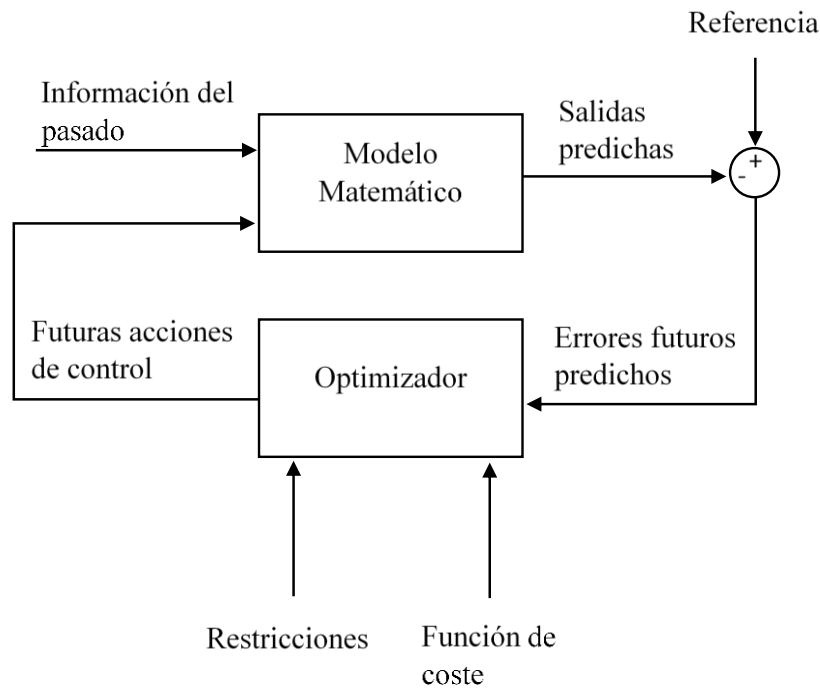


Figura 5. Diagrama esquemático de controlador MPC [7]

En la representación de la estructura básica de un controlador MPC, se aprecia el comportamiento de los elementos que componen al controlador en relación a las variables del proceso. Se tiene el modelo matemático en donde actúa la información de las entradas y salidas conocidas, así como las acciones de control a aplicarse para predecir la evolución de la salida, se compara con una señal de referencia, y se corrige mediante un optimizador que calcula las acciones de control futuras a partir de la función de coste y posibles restricciones.

Emplear este tipo de controlador posee ventajas con respecto a otros algoritmos clásicos de control, principalmente la versatilidad al momento de adaptarse con facilidad a sistemas en los que se ejecutan procesos de dinámica simple y/o compleja, sin embargo, para que esto sea posible se debe disponer de un modelo matemático que describa de forma fiel dicho proceso, esto también representa una desventaja, pues el modelado de la planta a controlar, se considera una necesidad específica, ocasionando procesos costosos para la identificación del sistema, y riesgos como un modelo poco preciso e inconveniente [27].

Estrategia de control

La metodología para la ejecución de este algoritmo de control consiste que en cada instante de tiempo t , se utiliza un modelo en complemento de valores de entradas y salidas conocidas hasta ese instante, para calcular las salidas futuras a lo largo de un horizonte

de predicción Np , donde se minimiza una función f que expresa la diferencia entre los valores de la salida de la planta (y), la referencia (w), y el esfuerzo de control (u), definido en la ecuación (4).

$$\min_u f(|y - w|, |u|) \quad (4)$$

Esto se traduce, en que cada instante de tiempo t , se calcula una secuencia de control a partir de un modelo sobre un horizonte finito Np a partir del instante $x(t)$, tal que:

$$u(t/t), u(t + 1/t), u(t + 2/t), \dots, u(t + Np/t) \quad (5)$$

Sin embargo, generalmente de esta secuencia solo se implementa el primer valor $u(t/t)$, para luego repetir la optimización en base a nuevas mediciones de la planta a partir del estado $x(t + 1)$.

Las mediciones que se incorporan en el cálculo de esfuerzo de control implican la introducción de realimentación en el sistema controlado, que permite una optimización “on line” a pesar de que se conozca la referencia a futuro [28].

Función objetivo

La función del controlador MPC busca establecer que la salida futura del sistema siga una determinada señal de referencia sobre el horizonte de predicción, minimizando el error entre ambas señales, al mismo tiempo que se reduce el esfuerzo de control requerido para hacerlo [29], esta función se expresa de la ecuación (6).

$$J = \sum_{i=1}^{Np} \delta [y(t + i) - w(t + i)]^2 + \sum_{i=1}^{Nc} \lambda [\Delta u(t + i - 1)]^2 \quad (6)$$

Donde:

- Np = Horizonte de predicción
- Nc = Horizonte de control
- $y(t)$ = Salida del proceso
- $w(t)$ = Señal de referencia

- $u(t)$, $\Delta u(t)$ = Señal de control, valor de cambio en la señal de control
- δ = Peso dado a la señal de salida para la minimización del error
- λ = Peso dado a la señal de entrada para la manipulación del esfuerzo de control.

Restricciones

A través del cálculo de acciones de control y movimiento de variables manipuladas mediante un modelo dinámico y un vector de errores predichos, el controlador MPC puede asignar limitaciones a todas las variables controladas y manipuladas, estas restricciones se formulan de las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \quad (7)$$

$$\Delta u_{min} \leq u(t) - u(t - 1) \leq \Delta u_{max} \quad (8)$$

$$y_{min} \leq y(t) \leq y_{max} \quad (9)$$

Control PID

El control PID se define como un mecanismo de control que funciona en base a la realimentación, es usado en una gran cantidad de sistemas de control industrial. Su funcionamiento consiste en calcular el error entre un valor medido con un valor deseado. El PID se compone de tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo [30]. Cada uno de estos parámetros ejecuta una acción específica durante la ejecución de un proceso (ver Figura 6) la sumatoria de estas acciones es utilizada para ajustar al proceso mediante un elemento de control [31], los términos que componen este algoritmo se describen a continuación:

- **Proporcional:** Como su nombre lo indica, la acción de control es proporcional a la señal de error, con el objetivo de lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero. la expresión está dada por la ecuación (10).

$$P_{sal} = K_p e(t) \quad (10)$$

Donde K_p es la constante proporcional y $e(t)$ la señal de error, asimismo, se menciona que al aplicar la acción proporcional en un proceso se obtienen efectos como un

incremento en la velocidad de respuesta del sistema, una disminución del error del sistema de forma permanente y un aumento en la inestabilidad del sistema, siendo el último un efecto negativo que se debe reducir, de tal manera, el sistema alcance un punto de equilibrio que garantice la eficiencia del sistema.

- **Integral:** este modo de control calcula la integral de la señal de error con el propósito de disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por la acción de control proporcional. Esta acción de control se expresa en la ecuación (11).

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (11)$$

Se define a K_i como la constante integral y $e(t)$ la señal de error, la respuesta de esta acción se complementa con el modo proporcional, para formar el control P+I, utilizada para obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

- **Derivativo:** La función de esta acción es corregir el error proporcionalmente con la misma velocidad que se produce, de esta forma se mantendrá el error al mínimo evitando que se incremente. Se representa en la ecuación (12).

$$D_{sal} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

K_d es la constante derivativa y $e(t)$ la señal de error, esta señal de salida se suma a las señales P+I, y actúa cuando se presenta un cambio en la señal de error medida entre el punto de medida y el valor deseado.

En resumen, al realizar el análisis de cada componente por separado, se puede resaltar que la parte proporcional depende de un error actual, la parte integral depende de errores pasados y el derivativo se puede tratar como una predicción de errores futuros. En la actualidad la mayoría de controladores utilizados en procesos industriales corresponden a algoritmos de control PID.

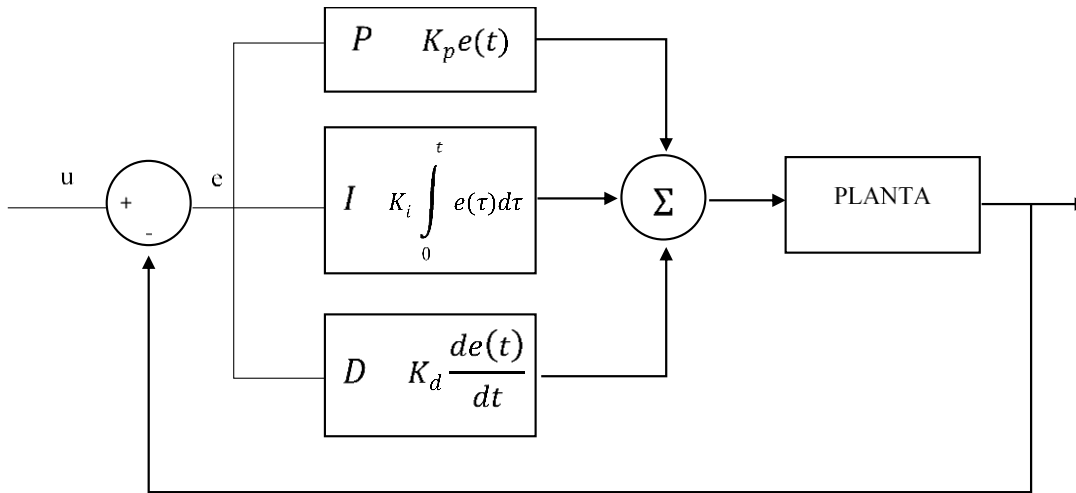


Figura 6. Diagrama esquemático de controlador PID [23]

Control mediante redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales se caracterizan por tratar de emular ciertas características propias del ser humano, una de ellas es la experiencia, que se percibe como un factor crítico al momento de resolver problemas. Las redes neuronales son un elemento importante dentro de la inteligencia artificial, donde su función principal es crear modelos artificiales que solucionen problemas de complejidad considerable a través de técnicas algorítmicas convencionales [32].

Una red neuronal artificial (ver Figura 7) se compone de: una capa de entrada, un conjunto intermedio de capas ocultas y una capa de salida. En cada una de las etapas hay un grupo de neuronas, donde sus salidas están conectadas a las entradas de la capa siguiente, el enlace resultante de dos neuronas tiene asociado un coeficiente denominado peso sináptico, el cual otorga a la red neuronal su potencial de cálculo y capacidad de aprendizaje [33].

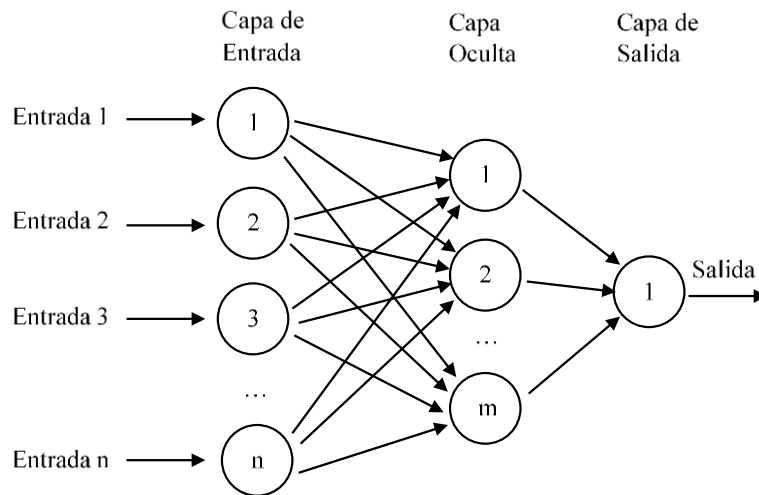


Figura 7. Secciones de una Red Neuronal [32]

Debido a la naturaleza del funcionamiento que tienen las redes neuronales artificiales (RNA), estas presentan una serie de ventajas que comprenden habilidades de: aprendizaje, auto organización, tolerancia a fallos y flexibilidad, estas propiedades sugieren que las RNA son aptas para aplicarse al control de sistemas.

El conocimiento de elementos de un sistema como sus entradas y salidas, complementado con las propiedades de las redes neuronales artificiales, proporcionan la habilidad de conseguir un sistema fiable a través del aprendizaje de un controlador integrado por una red neuronal capaz de modificar sus parámetros, de tal manera que la dinámica de la planta es aprendida, de modo que este algoritmo de control es variable en el tiempo debido cambio continuo de la estructura de la red, por lo cual se lo define como un controlador adaptable [34].

Existen varias técnicas aplicadas al aprendizaje una red neuronal, este proceso también puede describirse como “entrenamiento”, y se clasifican en: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, y aprendizaje por refuerzo. El aprendizaje supervisado puede definirse como una técnica que se basa en el emparejamiento de un vector u objeto de entrada a la red con su salida correspondiente, esta se compara con la salida deseada, y la diferencia se realimenta a la red para cambiar los pesos aplicando un algoritmo que tiende a minimizar el error, esto se realiza de forma cíclica y secuencialmente de manera que el error para el conjunto de entrenamiento sea un valor aceptable.

2.2.3 Elementos de un sistema de control

Un sistema de control está definido por varios componentes que actúan conjuntamente para otorgar una respuesta en relación al objetivo a alcanzar. Todo sistema se caracteriza por estar formado de los siguientes elementos:

- **Variables:** son diversas clases de señales que estarán presentes a lo largo de la ejecución de un proceso, como las variables controladas o de control, en ellas se aplican valores de consigna, fijadas para identificar errores y estabilizar el sistema, o también las perturbaciones que son señales no deseadas que alteran el funcionamiento de un sistema de forma adversa [35].
- **Sensores:** son elementos capaces de contar, posicionar, medir o clasificar, dicho de otra forma, es un dispositivo que detecta cambios en una determinada variable, para convertirlo en información que puede ser interpretada como un valor de medida[36], [37].
- **Actuadores:** es un elemento mecánico cuya función es proveer fuerza para que otro dispositivo de las mismas características trabaje sobre las variables de un sistema mediante su funcionamiento[37], [38]. La fuerza que proporciona un actuador tiene tres fuentes, que los clasifican en actuadores neumáticos, eléctricos o hidráulicos.
- **Unidad de control:** es el elemento encargado de comparar el valor de referencia (valor deseado) aplicado al sistema para ajustar las variables a controlar de un sistema dado.
- **Planta:** se considera una planta a cualquier equipo o conjunto de elementos de un sistema físico, donde su objetivo es realizar una operación deseada, algunos ejemplos de sistemas físicos son: hornos de calentamiento, vehículos espaciales o reactores químicos [39].

En el presente proyecto la planta sobre la cual se aplica control corresponde a un sistema de nivel de líquidos (ver Figura 8), definido como un sistema conformado por un conjunto interconectado de componentes separados capaz de generar y controlar la circulación de fluidos, los elementos principales que conforman este sistema son: un reservorio para almacenar el líquido, una bomba para impulsar el fluido a través del

circuito, y válvulas para controlar la presión y caudal del flujo. Esquemáticamente el sistema de nivel de líquido se representa de la siguiente forma.

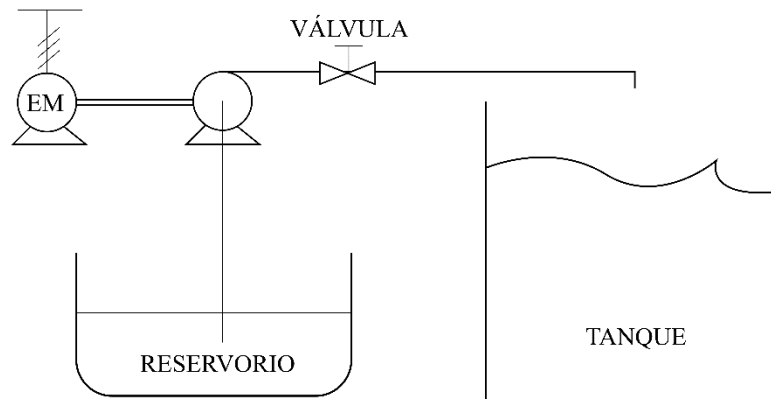


Figura 8. Sistema de nivel de líquido.

El proceso de una planta de nivel de líquidos se representa a continuación.

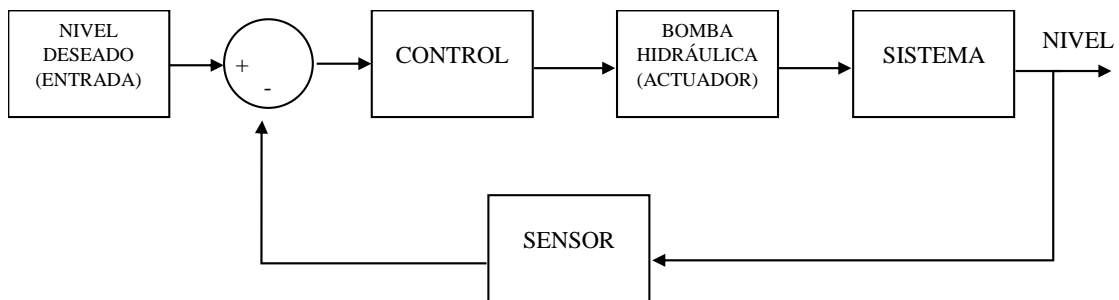


Figura 9. Diagrama de bloques de un sistema de nivel de líquido.

Los sistemas de control suelen ser descritos mediante diagramas de bloques, esta representación se utiliza para describir mediante gráficos, los componentes de un sistema, así como sus interconexiones [40]. Para este caso se representan los componentes de una planta que interactúan en el proceso de control del nivel de líquidos (Figura 9), resaltando los elementos físicos como sensores y actuadores, donde el conocimiento de su comportamiento es de vital importancia para obtener la estabilidad en el proceso realizado en la planta.

2.2.4 Propiedades teóricas de los elementos del sistema a controlar

Al utilizar un sistema de nivel de líquido como base para desarrollar la presente propuesta, se debe considerar que se compondrá de varios elementos, por tal motivo, es necesario comprender tanto las propiedades teóricas de cada elemento, así como de los fenómenos físicos que se presentan en la ejecución del proceso.

Propiedades de los fluidos

Los fluidos, ya sean líquidos o gases, son usados ampliamente en la industria por su versatilidad para transmitir señales y potencia. Para el análisis de sistemas donde interviene el flujo de líquidos, es necesario dividir los tipos de flujo en laminar y turbulento acorde a la magnitud del número de Reynolds [23].

Flujo turbulento: Número de Reynolds entre 3000 y 4000.

Flujo laminar: Número de Reynolds menor a 2000.

Los flujos laminares en un sistema pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales mientras que los que poseen flujos turbulentos se describen por ecuaciones diferenciales no lineales, resaltando que en las industrias la mayor parte de procesos que implican el nivel de líquidos son turbulentos y no laminares.

Bomba Hidráulica

Una bomba hidráulica es una máquina que absorbe energía mecánica y la transforma en energía hidráulica. Su comportamiento se representa a través de una altura de elevación total, dicha elevación es característica de cada bomba y responde a una función polinomial decreciente dependiente del flujo de descarga. En los sistemas donde interviene el flujo de líquidos, los tipos de bombas mayormente usados son las bombas centrífugas y periféricas [41].

Válvula de esfera

La válvula de esfera es un dispositivo que permite interrumpir la circulación de fluidos en un sistema, ya sea líquido o gas, como su nombre lo indica su mecanismo principal consta de una esfera perforada que gira entre asientos elásticos provocando el bloqueo o el paso del fluido, es uno de los tipos de válvulas más comunes y utilizadas debido a su facilidad para adaptarse a cualquier instalación [42].

Microcontrolador

El microcontrolador es un elemento electrónico con estructura similar a un ordenador computacional, debido a que cuenta con puertos/terminales de entrada y salida, así como, memorias de control y almacenamiento. Para el uso de estos elementos es necesario analizar hardware integrado en un chip, especificando su funcionamiento a través de programas que indiquen el algoritmo que el microcontrolador ejecutará [43].

Sensores ultrasónicos

Como su nombre lo indica, son dispositivos que miden la distancia de un objeto a través de ondas ultrasónicas. Se emite una onda ultrasónica desde el cabezal del dispositivo y este mismo, recibe una onda refleja que regresa desde el objeto, para determinar la distancia al objeto el sensor cuenta el tiempo entre la transmisión y la recepción [44].

Servomotores

Se trata de un actuador rotativo que establece el control en términos de posición angular, aceleración o velocidad de una manera precisa, estas propiedades no las tiene un motor normal, y pueden retroalimentarse a través de la medición de un sensor [45].

2.3 MARCO TEORICO

En la sección correspondiente al marco teórico se presentan diversos documentos investigativos, que han sido analizadas de tal manera que se usen como guía en relación a la presente propuesta de titulación.

En la tesis de maestría “CONTROL PREDICTIVO BASADO EN FRECUENCIA FIJA APLICADO AL ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO DE CINCO FASES” realizada por Osvaldo Gonzales B. en la Universidad Nacional de Asunción en 2017, destaca el uso del control predictivo basado en modelo de estados finitos (FCS-MPC) centrándose en el análisis teórico y la validación experimental en la implementación de estrategias de modulación en el control predictivo de corriente (MPCC), dentro de los controladores aplicados a sistemas multifásicos este algoritmo presenta un mayor análisis y propiedades de mayor alcance [46].

En el trabajo de titulación “ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO APLICADO A EL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDO DE UN SISTEMA DE 4 TANQUES ACOPLADOS” desarrollado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por Enrique Tlachi G. en 2018 plantea el diseño de un algoritmo basado en el control predictivo generalizado (GPC) aplicado a un sistema de cuatro tanques interconectados, representando a sistemas multivariables con el objetivo de implementar técnicas de control avanzado [47].

El proyecto de titulación “DISEÑO DE UN CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC) PARA UN INVERSOR DE POTENCIA MONOFÁSICO, APLICADO A UN GENERADOR FOTOVOLTAICO” realizado por Alex Saquillo D. en la Universidad de las fuerzas armadas en el año 2019, comprueba la robustez del algoritmo MPC mediante el uso de la estrategia de control predictivo generalizado (GPC) en su aplicación sobre un generador fotovoltaico, validando el correcto desempeño del sistema al compararlo con un controlador PI, demostrando la eficiencia del algoritmo desarrollado frente a perturbaciones [48].

En el mismo año, en la Universidad Politécnica de Madrid, Mohammad Zarei realiza su tesis doctoral “MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) FOR THE POWER CONVERTERS FOR RENEWABLE ENERGY GENERATION SYSTEMS WITH SWITCH FAULT TOLERANCE CAPABILITY”, presenta un novedoso control predictivo basado en modelo (MPC) aplicable a un sistema de control de convertidores electrónicos para sistemas de generación de velocidad regulable, además del desarrollo de un sistema de control directo de potencia predictivo (PDPC) [49].

En el año 2022, Bernardo Valadez H., en su tesis de maestría “CONTROL DE MODELO PREDICTIVO (MPC) NO-LINEAL PARA LA COLUMNA PETLYUK: COSIMULACIÓN MATLAB-ASPEN” describe la mejora de la precisión de un controlador por modelo predictivo (MPC) aplicándolo a una columna de destilación Petlyuk, mediante el uso de un modelo no lineal desarrollado a base de una red neuronal artificial (RNA) en lugar de utilizar un modelo lineal [50].

CAPÍTULO III

DESARROLLO

Este capítulo corresponde a los elementos y técnicas empleadas en el presente proyecto, explicando su función e importancia en el desarrollo del mismo.

3.1 COMPONENTES DE LA PROPUESTA

Se hace mención de los componentes tanto físicos como lógicos, utilizados en el desarrollo de la propuesta, mencionando características importantes y una explicación breve de cada uno de ellos.

3.1.1 Componentes físicos

Un sistema físico que controla el nivel de líquido está conformado por varios componentes electrónicos y eléctricos que cumplen con funciones específicas dentro del proceso industrial para el que está diseñado, estos elementos se detallan a continuación.

Arduino MEGA

Es una tarjeta de desarrollo de código abierto, posee un microcontrolador Atmega2560, dispone de entradas y salidas tanto analógicas, como digitales, es aplicado al desarrollo de objetos interactivos autónomos, también es capaz de interconectar varios componentes del sistema con un software de control compatible.

Sensor ultrasónico HC-SR04

Es un sensor que permite medir distancia mediante ultrasonido dentro de un rango que va desde los dos centímetros hasta los cuatrocientos cincuenta centímetros a través de sus dos transductores, destaca por su tamaño reducido, bajo consumo energético y una precisión aceptable, En el sistema a controlar, este dispositivo es utilizado para medir el nivel de líquido en un tanque de forma constante .

Servomotor MG 995

Es un elemento actuador rotativo lineal, se caracteriza por su capacidad de poder ubicarse en cualquier punto de su rango de funcionamiento, esto permite controlar con precisión la posición, velocidad y/o aceleración angular. En el presente proyecto este

elemento posee la utilidad de manipular la posición de la válvula de control en función de la altura a la que se requiera llegar.

Bomba de accionamiento magnético MKII

Es un tipo de bomba centrífuga que utiliza imanes para girar el impulsor a diferencia de las bombas tradicionales que utilizan un eje mecánico para realizar la misma acción, lo que presenta ventajas al momento de mover líquidos dentro de un sistema hidráulico.

Válvula de esfera de mariposa H/H ½”

También llamada válvula de bola, es un elemento que controla el flujo mediante una esfera hueca que controla el fluido que circula a través de ella. El conducto está abierto cuando el orificio de la esfera está alineado con la entrada del flujo y cerrado cuando la esfera gira noventa grados y bloquea el flujo.

3.1.2 Componentes lógicos

La implementación de los algoritmos de control aplicados en el presente proyecto se realiza a través de programas computacionales especializados para la ejecución del proceso.

Matlab - Simulink

Matlab - Simulink es un software de programación/simulación que ofrece un ambiente de desarrollo integrado, sus componentes facilitan la identificación del sistema, generando la función de transferencia que describe el comportamiento del proceso a controlar. Además, su complemento Simulink provee un entorno de programación visual donde se dispone de elementos que permiten representar el sistema a través de bloques que agilizan la simulación de los algoritmos de control sobre el sistema de nivel de líquido. Para establecer la conexión entre dispositivos del sistema mediante el software de simulación es necesario incorporar librerías que habiliten la comunicación de los elementos a utilizar, en este caso el software Simulink debe comunicarse con la placa Arduino mega y el sensor ultrasonico HC-SR04, una vez incorporados los elementos que habiliten la comunicación se podrá interactuar con todos los componentes del sistema.

3.2 DISEÑO DE LA PROPUESTA

Esta sección presenta el uso de análisis teóricos y experimentales dentro del desarrollo de la propuesta, donde se incluyen ecuaciones, formulas, simulaciones y pruebas experimentales.

3.2.1 Sistema de nivel de líquido e identificación de variables significativas

Una planta de llenado de tanque de primer orden (Ver Figura 10), es el sistema principal sobre el cual se desarrollan y aplican algoritmos de control automático, este sistema está conformado por un reservorio donde se almacena el líquido, una bomba hidráulica que lo impulsa hacia el sistema, válvulas que controlan la circulación y un tanque en donde se mide la altura a la que llega el líquido.

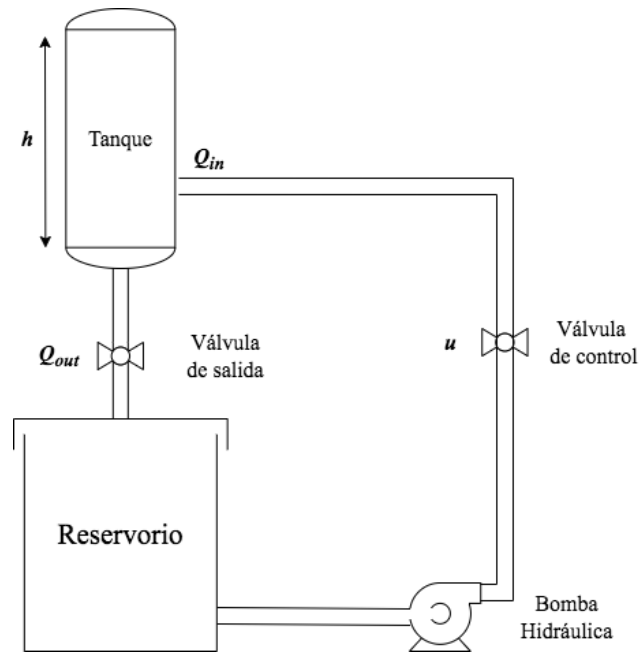


Figura 10. Planta de nivel de líquido y sus variables.

En este sistema se puede identificar la altura del tanque como la variable a controlar, para ello se manipula el caudal de entrada a través de una válvula de control, mientras que la variable que afecta al sistema es el caudal de salida que ocasiona una disminución en el nivel del líquido que contiene el tanque.

Las variables que conforman el sistema están dadas de la siguiente forma:

- $h \rightarrow$ Nivel del tanque (variable controlada)
- $Q_{in} \rightarrow$ Caudal de entrada (variable del proceso manipulada)
- $u \rightarrow$ Elemento de control (variable manipulada)
- $Q_{out} \rightarrow$ Caudal de salida

En resumen, u será la variable que determina la apertura de la válvula para manipular la variable del proceso Q_{in} y de esta manera alterar la variable controlada h .

3.2.2 Modelado teórico del sistema

Para determinar la dinámica de la planta se utilizan ecuaciones matemáticas que describen teóricamente el comportamiento del sistema en base a las variables dadas por los dispositivos que lo componen, en el modelado matemático de nivel de líquido se aplica la ley de la conservación de la masa en el tanque donde se controla la altura a la que llega el líquido.

Dinámica del sistema

Se aplica la ley de conservación de masa en el tanque obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (13)$$

$Q_{out}(t)$ representa el caudal de salida del tanque en función del tiempo, su paso a través de una válvula se representa de la siguiente forma:

$$Q_{out}(t) = ka\sqrt{2gh} \quad (14)$$

Donde k es el coeficiente de flujo de la válvula, a representa la apertura de la válvula en un rango de cero a uno y g es la aceleración de la gravedad.

De forma análoga, el caudal de entrada $Q_{in}(t)$ al ser proporcional a la apertura de la válvula, se expresa como:

$$Q_{in}(t) = ka \quad (15)$$

Tomando en consideración estos aspectos es necesario expresar la variable $V(t)$ en términos que permitan que la ecuación (13) se pueda representar totalmente en términos de altura (h), se obtiene la siguiente igualdad:

$$V(t) = h(t) \cdot A \quad (16)$$

Al derivar la ecuación (16) se obtiene:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{dh(t)}{dt} \cdot A \quad (17)$$

A es la sección del tanque donde se realiza el control de nivel y $\frac{dh(t)}{dt}$ la variación de la altura del tanque respecto al tiempo, si se sustituyen las ecuaciones (14), (15) y (17) en la ecuación (13) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dh}{dt} \cdot A = k_1 a_1 - k_2 a_2 \sqrt{2gh} \quad (18)$$

La ecuación (12), corresponde a la expresión que modela matemáticamente un sistema de nivel de líquido controlado por válvulas, cabe recalcar que el modelo presentado es no lineal, pues no cumple con los principios de homogeneidad ni de superposición.

Modelado lineal de un sistema de nivel de líquido través de series de Taylor

Para encontrar el modelo lineal del sistema se debe encontrar un punto de equilibrio en el sistema, el cual se da cuando no existe variación en el nivel de líquido del tanque, lo cual se puede expresar de la siguiente manera.

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (19)$$

Se reemplaza los elementos de la ecuación (19) por sus equivalentes de las expresiones (14) y (15).

$$k_2 a_2 \sqrt{2gh} = k_1 a_1 \quad (20)$$

De la ecuación (20) se despeja la variable h que definirá el nivel de líquido en un punto de equilibrio.

$$h = \left(\frac{k_1 a_1}{k_2 a_2 \sqrt{2g}} \right)^2 \quad (21)$$

Para definir el valor de las constantes de la ecuación (21) se utilizan las características de los elementos físicos del sistema descritas a continuación:

- **Tanque de nivel:** Posee forma prismática, las dimensiones de largo y ancho son de $0.14m \times 0.17m$ respectivamente dando un área equivalente a $A = 0.0238 m^2$.
- **Caudal de entrada:** Se toma el caudal de líquido que provee la bomba centrífuga, que corresponde a $19 \frac{L}{min}$, que corresponde a $3.17 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$ realizando la conversión al sistema internacional.
- **Caudal de salida:** Se realiza un cálculo aproximado del flujo a través de la válvula de perturbación, dando un resultado de: $2.40 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$.

Reemplazando los valores obtenidos a partir del estudio del sistema físico se obtiene un punto de equilibrio en:

$$h = 0.65 m \quad (22)$$

A partir del punto de equilibrio se realiza un modelo matemático mediante series de Taylor, fijando la válvula a_1 como variable de control y la variable a_2 como una salida constante, las funciones de Taylor se expresan a continuación.

$$f1(a_1, h) = A \frac{dh}{dt} \quad (23)$$

$$f1(a_1, h) \approx f1(\bar{a}_1, \bar{h}) + \left. \frac{\partial f}{\partial a_1} \Delta a_1 \right|_{(\bar{a}_1, \bar{h})} + \left. \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \right|_{(\bar{a}_1, \bar{h})} \quad (24)$$

Se evalúa la función de Taylor en función de la ecuación (18)

$$f1(a_1, h) \approx k_1 \bar{a}_1 - k_2 a_2 \sqrt{2g\bar{h}} + k_1 \Delta a_1 - \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h \quad (25)$$

Se reescribe la ecuación (25), en función de la equivalencia que expresada en la función (23).

$$\frac{Adh}{dt} \approx \frac{Adh}{dt} \Big|_{(\bar{a}_1, \bar{h})} + k_1 \Delta a_1 - \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h \quad (26)$$

Se despejan los términos que poseen diferenciales de altura

$$\frac{Adh}{dt} - \frac{Adh}{dt} \Big|_{(\bar{a}_1, \bar{h})} \approx k_1 \Delta a_1 - \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h \quad (27)$$

Se establece la resta de los diferenciales como la variación de altura en la ecuación (27), expresada de la siguiente forma.

$$A \frac{d\Delta h}{dt} \approx k_1 \Delta a_1 - \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h \quad (28)$$

Se aplica la transformada de Laplace a (28)

$$A s h(s) = k_1 a_1(s) - \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} h(s) \quad (29)$$

Se despeja la función de transferencia a partir de la ecuación (29), obteniendo la siguiente expresión

$$\frac{h(s)}{a_1(s)} = \frac{k_1}{As + \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}} \quad (30)$$

De manera análoga, se realiza el mismo proceso tomando en consideración a la válvula a_1 como una salida y a_2 como una válvula de control, se establece la siguiente función de Taylor.

$$f1(a_2, h) \approx f1(\bar{a}_1, \bar{h}) + \frac{\partial f}{\partial a_2} \Delta a_1 \Big|_{(\bar{a}_2, \bar{h})} + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \Big|_{(\bar{a}_2, \bar{h})} \quad (31)$$

De donde se obtiene la siguiente expresión al aplicar la transformada de Laplace

$$\frac{h(s)}{a_2(s)} = \frac{-k_2 \sqrt{2g\bar{h}}}{As + \frac{k_2 \bar{a}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}} \quad (32)$$

A partir de las expresiones obtenidas en (30) y (32) se obtiene la función de transferencia de una aproximación lineal del sistema de nivel de líquido en el punto de equilibrio y se define como:

$$G(s) = \frac{k_1}{As + \frac{k_2 a_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}} - \frac{k_2 \sqrt{2g\bar{h}}}{As + \frac{k_2 \bar{a}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}} \quad (33)$$

Evaluando la ecuación (33) en el punto de equilibrio, se obtiene la aproximación lineal del sistema:

$$h(s) = \frac{0.013}{s + 0.011} a_1 - \frac{0.036}{s + 0.0277} a_2 \quad (34)$$

Se compara las respuestas del sistema acorde a los modelados matemáticos lineales y no lineales observados a continuación (ver Figura 11):

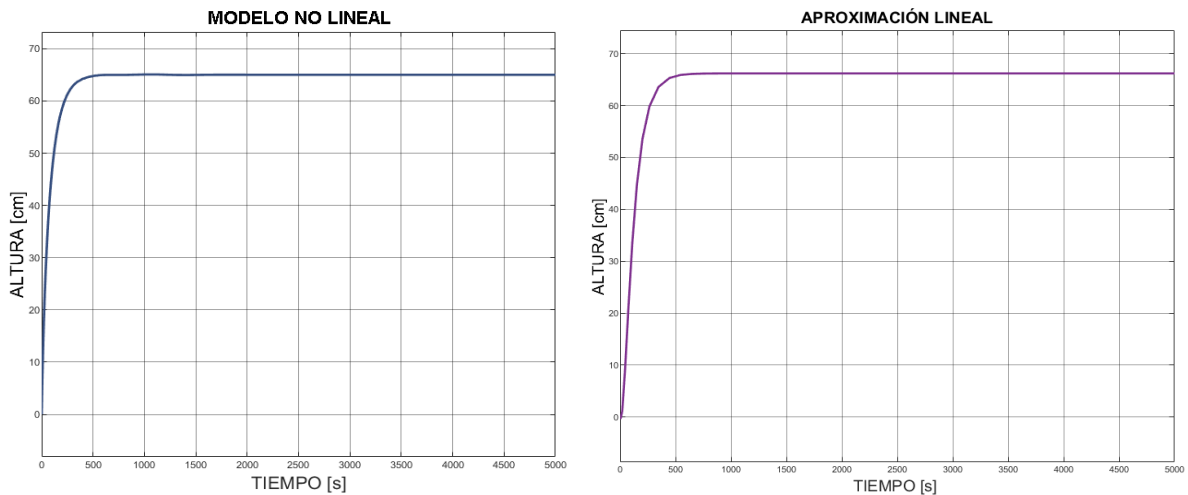


Figura 11. Comparativa de los modelados matemáticos no lineal (izquierda) y linealizado (derecha)

Se determina la similitud entre las representaciones matemáticas analizadas a través de la respuesta del sistema en base a la identificación del fenómeno físico que rige su comportamiento.

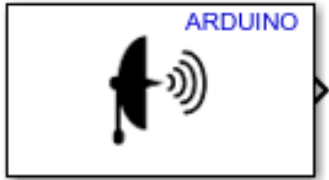

3.2.3 Identificación del modelo matemático en espacio de estados del sistema físico de nivel de líquido

Previo al diseño de los controladores a aplicarse en el proceso, se debe obtener una representación del comportamiento del sistema. Para la presente propuesta se utilizará el espacio de estados como herramienta para expresar la dinámica de la planta, esto a realizarse a partir de la identificación del sistema utilizando el software Matlab & Simulink.

Construcción de la planta en Simulink

La operatividad del sistema de nivel de líquido se da gracias a la interconexión de los elementos de la planta con el software Simulink a través de la programación visual que ofrece este software y sus soportes con la placa Arduino, esta interacción da apertura a la representación de un modelo del sistema en su totalidad, los bloques utilizados en para la manipulación y verificación de sensores/actuadores se observan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Bloques a utilizar en el modelo del sistema en Simulink.

BLOQUE	DESCRIPCIÓN
	<p>Ultrasonic Sensor: Tiene la función de proporcionar los datos medidos por el sensor ultrasónico, en este caso la distancia a la que se encuentra el líquido en el tanque.</p>
	<p>Standart Servo Write: Introduce datos numéricos entre uno y ciento ochenta indicando la posición a la que se debe mover el servo motor con el objetivo de abrir o cerrar la válvula de control.</p>

El sensor ultrasónico utilizado en este sistema presenta características que dificultan la adquisición de datos de nivel de líquido en el tanque, estas anomalías representan una medida errónea en la distancia debido a la naturaleza de su funcionamiento, pues este elemento mide la distancia al objeto mas no un nivel específico, sumado a esto también se encuentran las perturbaciones provocadas por el ruido en la señal del sensor, por lo tanto, estas dificultades deben ser corregidas aplicando operaciones lógicas que faciliten la escala de medida y un filtro que reduzca el ruido respectivamente.

- **Escalamiento del sensor:** este elemento está diseñado para medir la distancia existente al objeto, es decir que, en este sistema el sensor indica el espacio existente hasta la superficie del líquido, por esta razón se adapta el cálculo de la distancia a través de la ecuación (35).

$$\text{Señal Escalada} = \text{Altura del Tanque} - \text{Señal Sensor} * 100 \text{ [cm]} \quad (35)$$

- **Filtrado de la señal:** Debido a que la señal enviada por el sensor posee ruido que impide una correcta interpretación de los datos, se debe aplicar un filtro que reduzca los disturbios en la lectura de este elemento. El filtro a utilizar corresponde a la aplicación de la Media móvil exponencial (EMA) que es un filtro pasa-bajo de primer orden, que tiene por objetivo atenuar el ruido presente en señales, el funcionamiento del filtro es mostrado en la ecuación (36).

$$S(t) = \begin{cases} Y(0) & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) & t > 0 \end{cases} \quad (36)$$

Donde:

- α = Factor de suavizado entre cero y uno.
- $Y(t)$ = Valor de la señal a filtrar en un periodo de tiempo t .
- $S(t)$ = Valor de la señal filtrada.
- $S(t - 1)$ = Valor de la señal filtrada en un periodo de tiempo $t-1$.

La aplicación de este filtro pasa-bajo con un valor de suavizado de $\alpha = 0.05$ en la toma de datos del sensor ultrasónico se aprecia en la Figura 12.

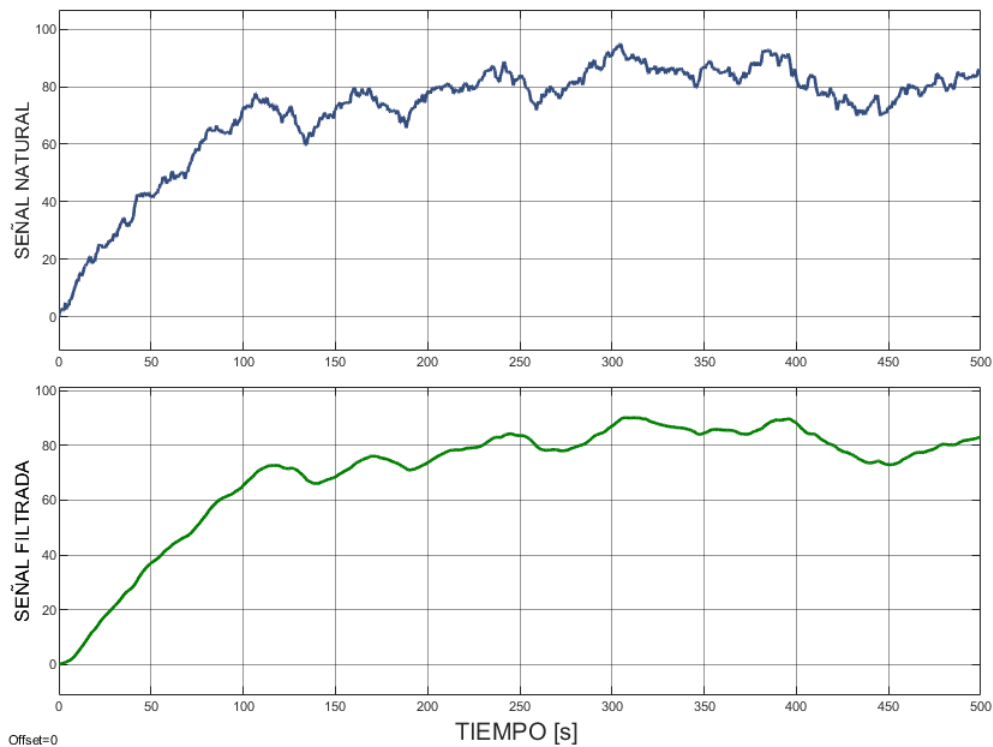


Figura 12. Filtro pasa bajo aplicado a una señal

Se realiza una prueba para verificar la efectividad del filtro a aplicarse en el sensor, donde se aprecia como el filtro cumple con el objetivo de atenuar el ruido presente en la señal (color verde), de esta manera se acondiciona la señal que es utilizada para la adquisición de datos del sistema y que posteriormente se presentan como una pieza clave en el desarrollo de los sistemas de control en la presente propuesta.

Adquisición de datos

Con los elementos ya acondicionados al proceso que se requiere realizar, se procede a la adquisición de los datos para el modelo matemático del sistema, para ello se crea el esquema grafico de la planta en el software Simulink complementándolo con bloques de almacenamiento de información que agilizaran la toma de datos del proceso.

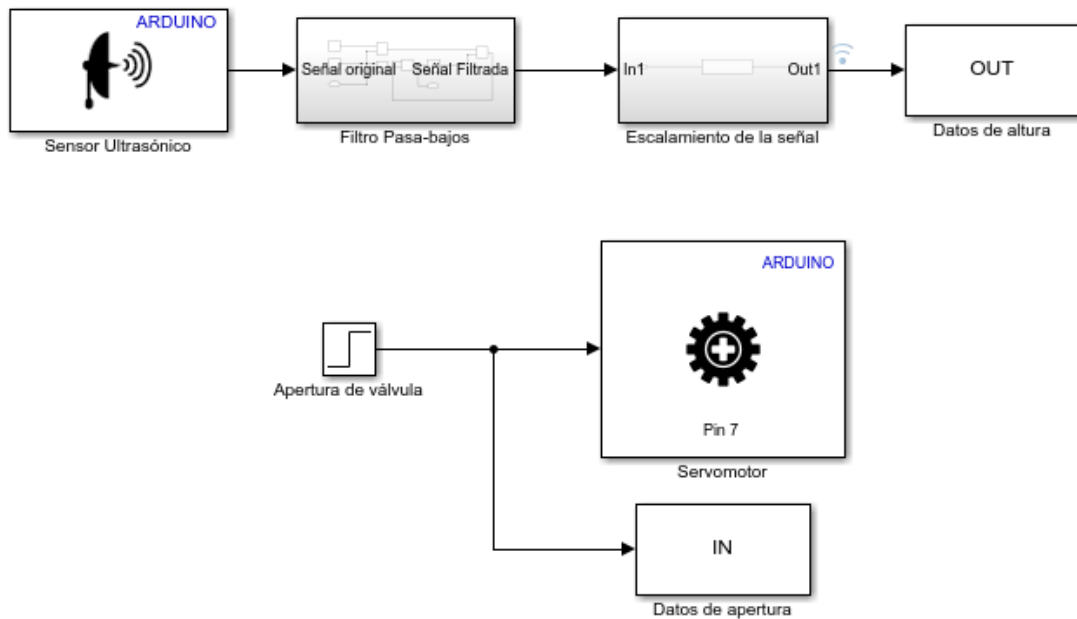


Figura 13. Esquema grafico para la adquisición de datos de la planta.

En la Figura 13 se aprecia la construcción de la planta en Simulink para la toma de datos en lazo abierto, donde la altura dada por el sensor muestra la evolución de la salida, mientras que una señal variable manipula la apertura de la válvula y por ende a la entrada del sistema, la información recopilada sobre la entrada y la salida del proceso de la planta es almacenada en los bloques IN y OUT respectivamente. Para la señal de entrada se ajustó una apertura de la válvula entre $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

En la construcción del sistema se toma en consideración las capacidades que tienen los elementos físicos y como deben relacionarse entre sí para asegurar un correcto funcionamiento del proceso, por tal motivo se establece la siguiente lógica para el proceso:

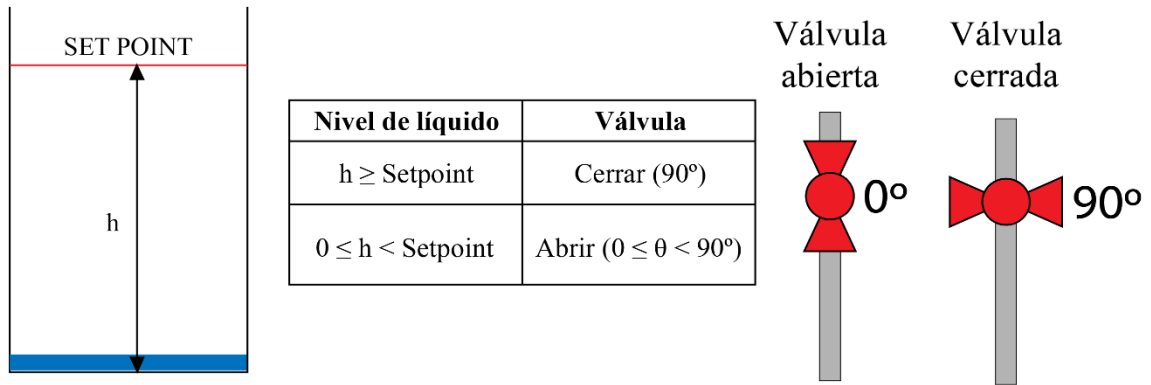


Figura 14. Lógica de funcionamiento de la planta de nivel de líquido.

La lógica de control descrita en la Figura 14 indica que el rango de operación de la válvula en relación con el servomotor debe estar entre cero grados cuando la válvula está abierta en su totalidad y noventa grados cuando esté completamente cerrada. Dependiendo del nivel de líquido en el tanque en comparación con el punto de consigna, el servomotor mueve la válvula de control en sentido horario o anti horario para aumentar o reducir el flujo de entrada al sistema.

Adquisición de datos e identificación del modelo matemático en espacio de estados

Conociendo las propiedades, limitaciones e interacciones físicas de cada elemento del sistema, se procede a tomar los datos correspondientes a la ejecución del proceso de la planta en lazo abierto, tomando como entrada al sistema una apertura variable en el rango de $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ y como variable de salida la altura en el tiempo $h(t)$ como se observa en la Figura 15.

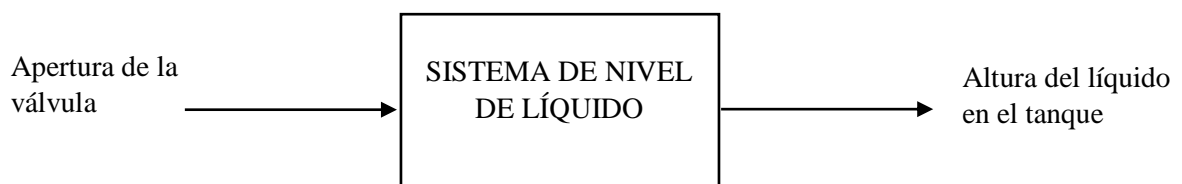


Figura 15. Diagrama SISO en lazo abierto del proceso

Los datos se almacenan con un tiempo de muestreo de 0.1 segundos, tomando un total de 3349 muestras que se utilizan en la identificación del sistema, el comportamiento de la salida medida a través de estos datos se describe en la figura 16.

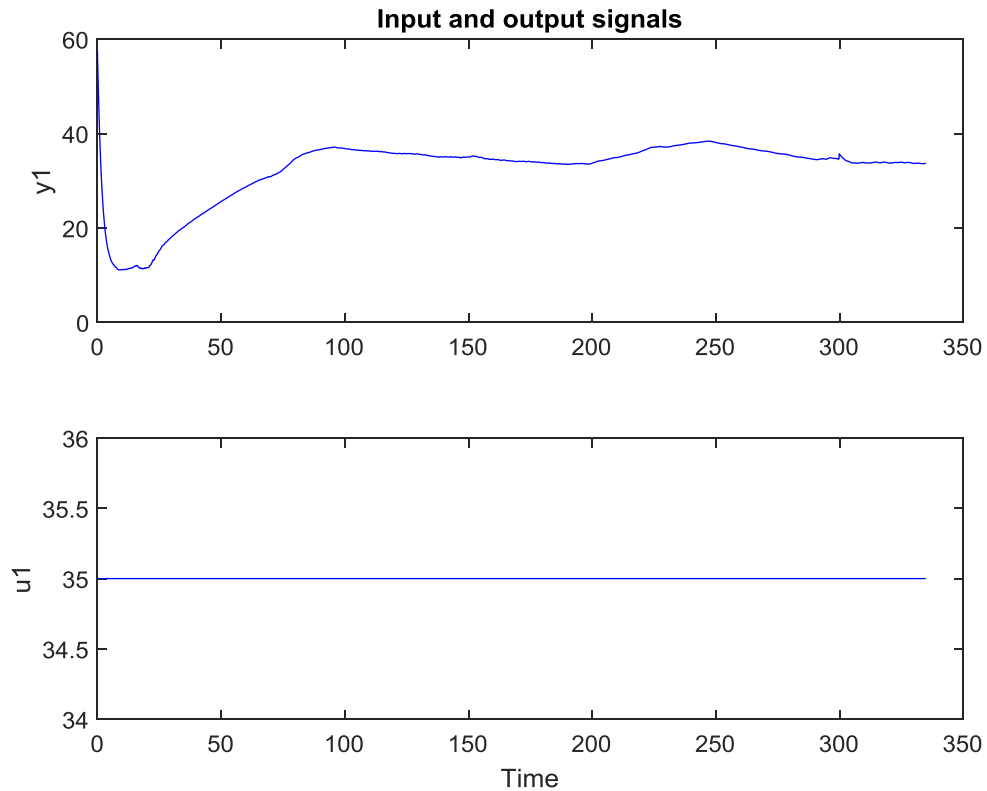


Figura 16. Comportamiento de la planta en lazo abierto.

Obtenidos los datos de interés, se procede a utilizar la herramienta Toolbox System Identification proporcionado por el software MATLAB para identificar la expresión en espacio de estados que representa a la planta (Ver Anexo 5).

Realizadas las pruebas con diversas estimaciones del modelo de la planta en espacio de estados, se selecciona la señal con mejor respuesta, la misma que será utilizada en el desarrollo de los algoritmos de control. La figura 17 muestra las señales de prueba utilizadas en la estimación del modelo matemático.

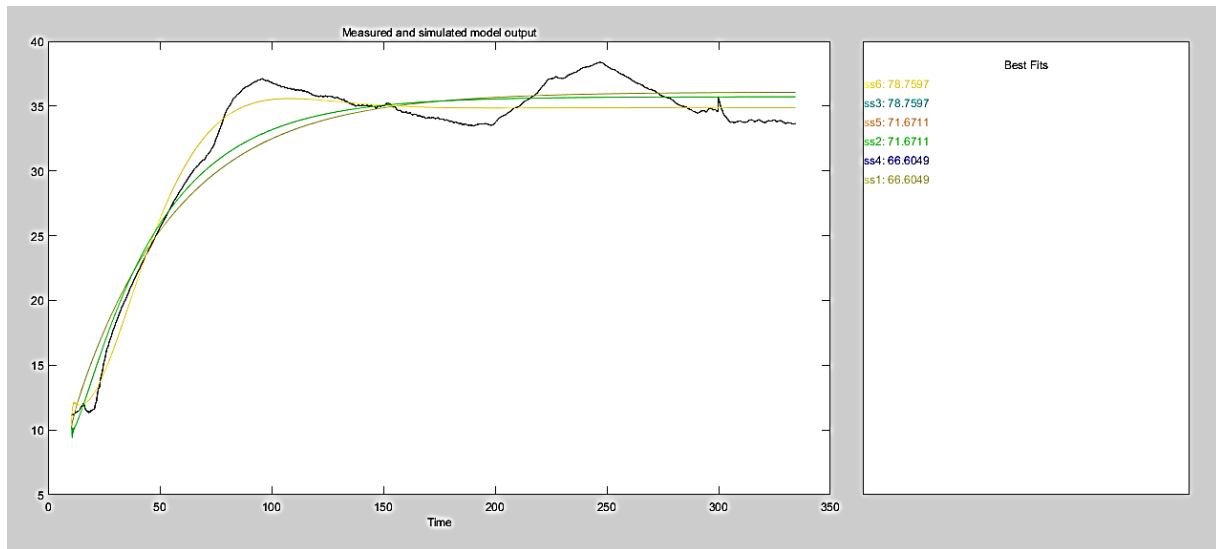


Figura 17. Señales en respuesta de la planta de nivel de líquido.

En la siguiente tabla se presentan los valores de aproximación de los diferentes modelos en espacio de estados evaluados en respuesta a la planta de nivel de líquido, de esta manera se define la señal con mejores condiciones para utilizar en el desarrollo de los controladores.

Tabla 2. Valores de aproximación de cada modelo de espacio de estados.

Modelo	Estimación	Tipo	Orden	Aproximación
SS1	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Continuo)	Orden 2	66.6%
SS2	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Continuo)	Orden 4	71.67%
SS3	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Continuo)	Orden 5	78.76%
SS4	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Discreto)	Orden 2	66.6%

SS5	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Discreto)	Orden 4	71.67%
SS6	State Space Model	Espacio de estados (Tiempo Discreto)	Orden 5	78.76%

Como se aprecia en la Tabla 2 se presentan seis representaciones del modelo matemático adquiridas mediante estimaciones tanto en tiempo discreto como en continuo, también considerando que los modelos adquiridos sean de orden dos, cuatro y/o cinco, debido a que modelos de orden tres, seis o superior se alejan de la salida requerida, por consecuente se selecciona el modelo “SS3” que corresponde a un modelo en espacio de estados identificado en tiempo discreto de quinto orden y una aproximación del 78.76 % como la representación del sistema, este modelo obtenido se utiliza en el desarrollo de los algoritmos de control MPC, PID y RNA.

El modelo en espacio de estados final está dado por las ecuaciones (2) y (3):

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Donde:

A=

	X1	X2	X3	X4	X5
X1	-0.0202	-0.0312	0.0308	0.0278	-0.0341
X2	0.0436	-0.1935	2.5160	0.7664	-2.1684
X3	0.0214	0.0161	-1.2706	-15.8852	4.2909
X4	-0.0120	-0.1084	9.1442	-0.5951	14.3070
X5	0.0099	-0.0942	-0.2008	-9.4664	-1.8233

B=

	U (Set Point)
X1	2.6811e-05
X2	1.1835e-04
X3	-0.0089
X4	-0.0031
X5	-0.0049

C=

	X1	X2	X3	X4	X5
Y (Altura)	339.2835	-0.3575	0.0599	-0.0321	-0.0788

D=

	U (Set Point)
Y (Altura)	0

El modelo de quinto orden en espacio de estados es seleccionado luego de evaluar diferentes modelos de diversos órdenes y tiempos. Aunque el sistema real es de primer orden, la complejidad adicional que proporciona el modelo de quinto orden permitió una mejor aproximación al comportamiento real de la planta de nivel de líquido, lo que provee un mejor desempeño al controlador. Además, el modelo de quinto orden permite identificar las dinámicas internas e interacciones entre los elementos del sistema, lo que es importante para el diseño y la implementación del controlador.

Las variables de estado son variables internas del sistema que definen su comportamiento dinámico a lo largo del tiempo. En el modelo de espacio de estados presentado, las variables de estado son X_1 , X_2 , X_3 , X_4 y X_5 , las cuales representan la altura del líquido, el flujo de entrada y salida del líquido, la velocidad de cambio de la altura del líquido y la acumulación del flujo de entrada y salida del líquido, respectivamente. Estas variables se utilizan para definir las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema y son la base para el diseño y la implementación del controlador.

3.2.4 Diseño y desarrollo del controlador PID

A continuación, se describe el desarrollo del algoritmo de control PID, explicando el método utilizado para sintonizar el controlador y las características presentadas en el sistema de nivel de líquido al momento de aplicarlo.

Diseño y sintonía del controlador

Para obtener los parámetros del controlador PID, se pueden utilizar técnicas de identificación de sistemas para obtener una aproximación del modelo matemático de la planta y luego aplicar técnicas analíticas para el diseño del controlador PID (diseño de controladores con toolbox de simulink). Además, existen métodos de sintonización del controlador PID basados en reglas heurísticas o algoritmos de optimización que no requieren un conocimiento profundo del modelo matemático de la planta. Sin embargo, es cierto que en algunos casos puede ser necesario recurrir a métodos experimentales para obtener los parámetros óptimos del controlador PID. En cualquier caso, la selección del método de sintonización dependerá de las características y complejidad específicas de la planta y del sistema de control en cuestión.

Entre los procedimientos experimentales están los propuestos por Ziegler y Nichols a través de reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , tiempo

integral Ti , y tiempo derivativo Td mediante el análisis de las características de la respuesta transitoria de una planta [23].

Existen dos métodos para la sintonía mediante las reglas de Ziegler-Nichols, estas son:

- **Primer método (curva de acción):** Este método se aplica a partir de la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario, si el sistema no posee integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la respuesta al escalón tendrá forma de S también llamada Sigmoideal, condición para poder aplicar este método, pues esta señal posee dos parámetros que la caracterizan: un tiempo de retardo L y la constante de tiempo T .

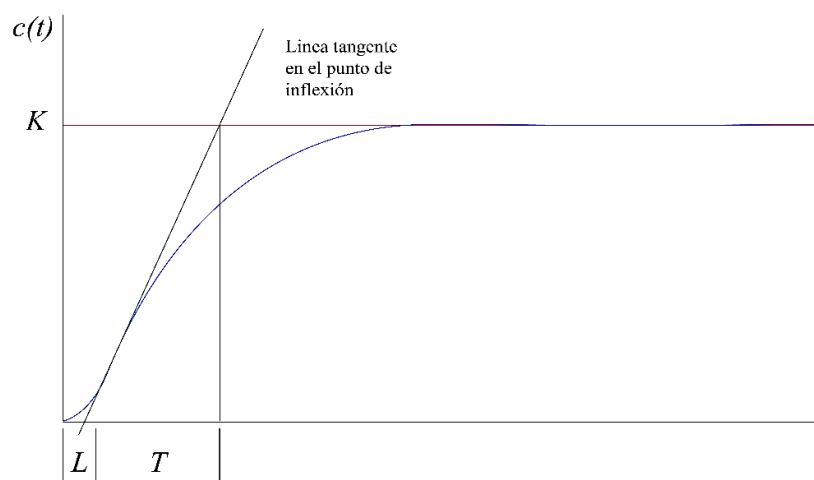


Figura 18. Señal de forma Sigmoideal [23]

Estos parámetros se determinan trazando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva sigmoide, tal como lo muestra la figura 18.

Para comprobar si este método es apto para sintonizar el controlador, se analiza la señal en respuesta de una señal escalón unitario, si presenta un comportamiento oscilatorio, integrador, o no cumple con las características de la señal Sigmoideal se opta por descartar el método.

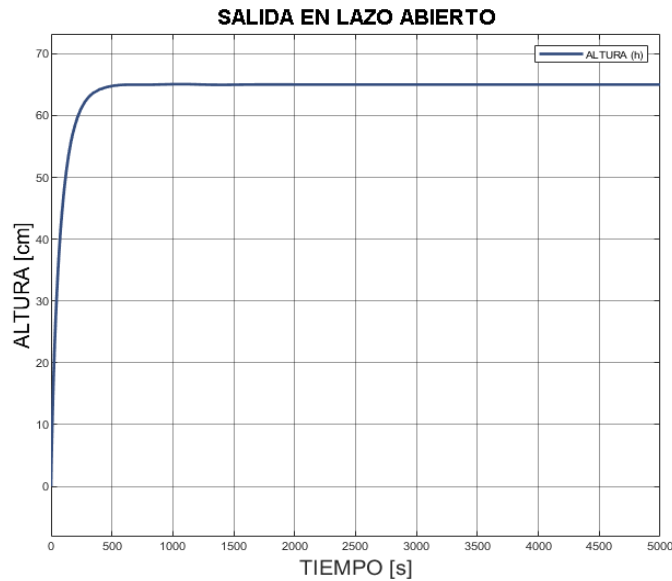


Figura 19. Comportamiento del sistema de nivel de líquidos.

En la Figura 19, se observa un comportamiento estable al aplicar una entrada de tipo escalón, no obstante, la respuesta del sistema es inmediata y no presenta ningún retraso, por consiguiente al no poseer las propiedades de una señal Sigmoidal, no es posible trazar la recta tangente que determine los parámetros para aplicar este método, por tal motivo, se descarta la sintonización por curva de acción.

- **Segundo método (Oscilación):** El segundo método de ajuste propuesto por Ziegler-Nichols indica que se debe fijar $Ti = \infty$ y $Td = 0$, provocando que la planta interactúe solo con la acción proporcional. Kp se debe incrementar desde cero hasta un valor crítico que consiga que el comportamiento de la salida sea oscilatorio con una amplitud constante (ver Figura 20). Si no existe un valor en la ganancia proporcional que consiga hacer oscilar el sistema, este método no puede ser aplicado para la sintonización del controlador [23].

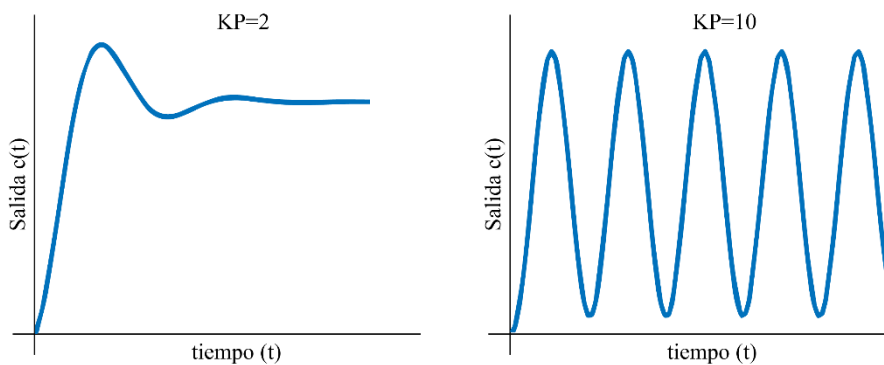


Figura 20. Método de oscilación de Ziegler-Nichols [23]

En la Figura 21 se puede apreciar la configuración del sistema en lazo cerrado. Los valores de las ganancias integrativa y derivativa se han fijado en cero con el objetivo de determinar experimentalmente si la dinámica del sistema es apta para la aplicación del segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonización del controlador.

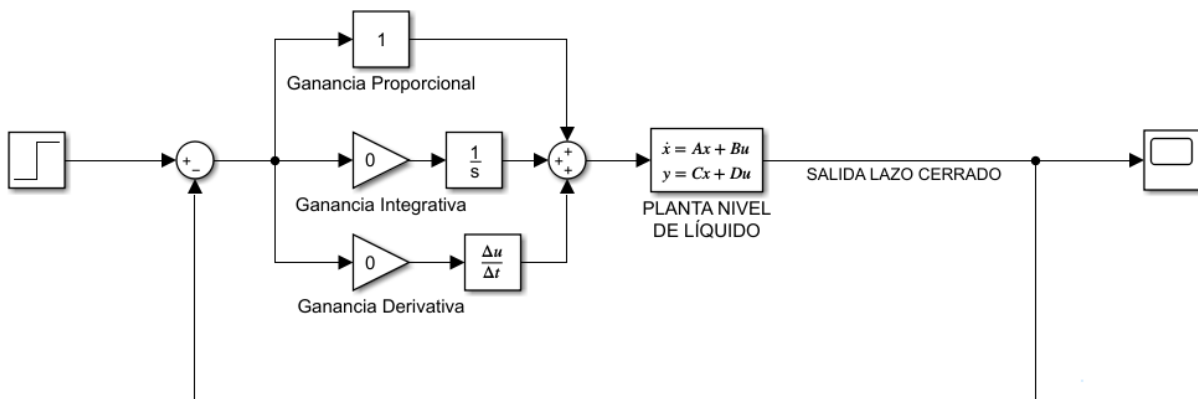


Figura 21. Configuración del método de la Oscilación de Ziegler-Nichols.

Es importante destacar que estos valores obtenidos mediante las reglas de Ziegler-Nichols son una aproximación y pueden requerir ajustes finos para garantizar un buen desempeño del controlador en la práctica. Además, es importante evaluar el desempeño del controlador mediante pruebas en el sistema real y realizar ajustes adicionales si es necesario.

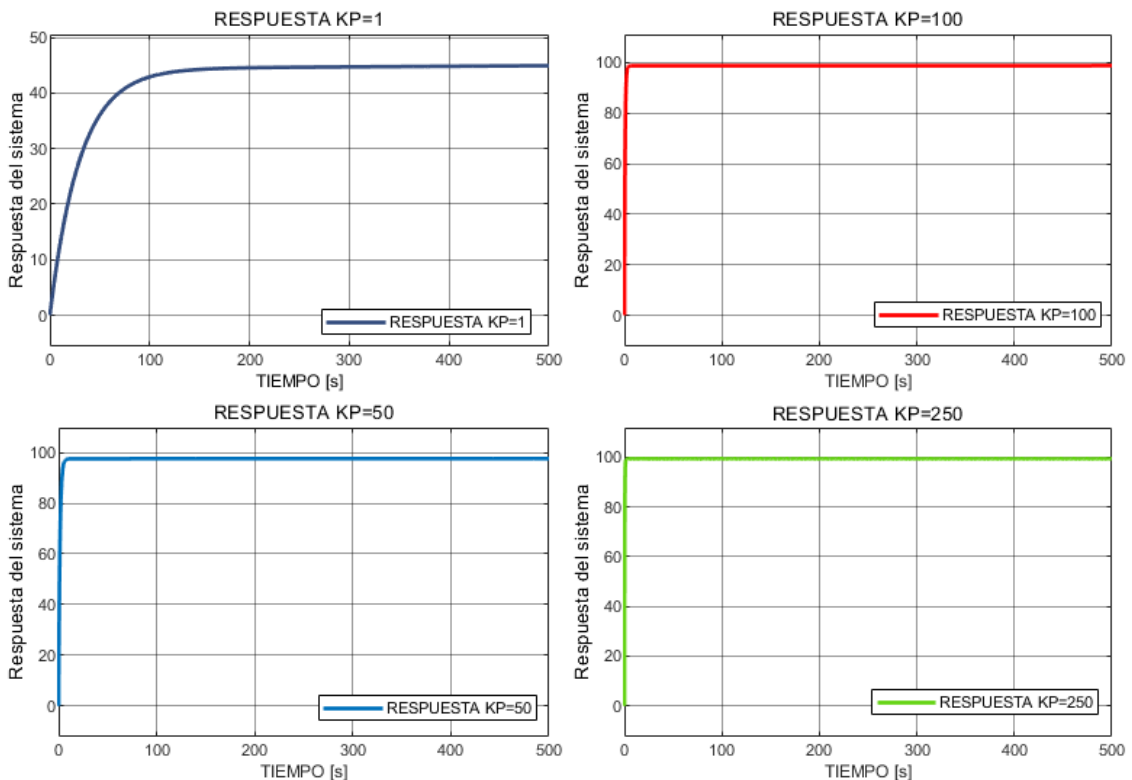


Figura 22. Comportamiento del sistema al aumentar la ganancia proporcional.

El comportamiento de la salida del sistema en varias pruebas se ve representado en la Figura 22, estas comprenden a respuestas estables, es decir que el sistema no presenta ningún tipo de oscilación al incrementar la ganancia proporcional, por lo tanto, al no poseer las condiciones necesarias, no es posible aplicar este método de sintonización.

Cabe recalcar que estos métodos son aplicados a menudo en plantas de las cuales no se conoce su comportamiento, sin embargo, cuando se posee el modelo matemático y se conoce el funcionamiento del sistema, se pueden utilizar otros métodos tanto gráficos como analíticos, por tal motivo, se opta por ajustar el controlador en complemento de las herramientas que ofrece el software de simulación junto al modelo matemático de la planta.

- **Método de optimización computacional:** este método emplea la información del comportamiento del proceso durante su ejecución utilizando herramientas computacionales tomando en consideración las características físicas de cada elemento, de esta manera se ajustan los parámetros del controlador PID de modo que cumpla con la finalidad del proceso.

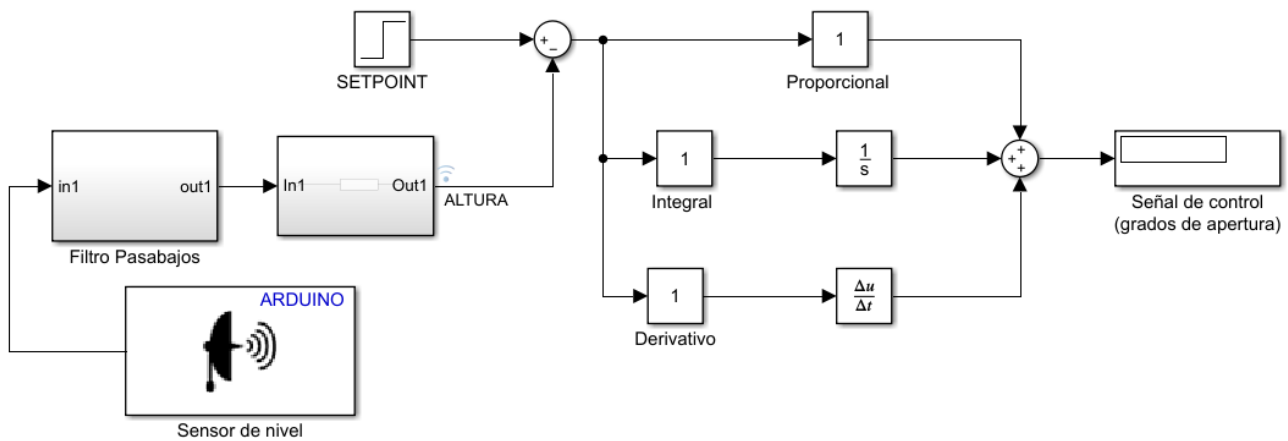


Figura 23. Configuración para sintonización de control PID

La configuración para la sintonización del control PID mostrada en la Figura 23 se basa en analizar la señal de control otorgada a partir de la variación de los coeficientes K_p , K_i , K_d y del error calculado entre los valores del SETPOINT y la lectura del sensor de nivel, teniendo en conocimiento que la señal de control manipulara los grados de apertura se considera limitarla al rango de funcionamiento del servomotor definido acorde

a la lógica de control de la planta, esto con el fin de encontrar respuestas relacionadas a los datos medidos, definiendo el punto de operación en el sistema.

Observaciones del Sistema

Durante la ejecución del proceso y la verificación de la acción de control se observan varias irregularidades que alteran el comportamiento del sistema de manera considerable, estas se describen a continuación:

Comportamiento inverso de la señal de control

Durante las pruebas realizadas en el sistema se observa que el actuador se comporta de manera inversa a lo que rige la lógica de control como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3. Comportamiento erróneo de la válvula en el sistema.

NIVEL DE LIQUIDO	VALVULA
$h \geq \text{SETPOINT}$	Abrir Válvula ($0^\circ \leq \theta < 90^\circ$)
$0 \leq h < \text{SETPOINT}$	Cerrar Válvula (90°)

Esto a consecuencia de la adquisición de los datos tomados acorde al modelado matemático, indicando que esta anomalía estará presente en todos los sistemas a desarrollar. Para solucionar esta acción errónea del actuador, se transforman los datos de entrada al servomotor utilizando la expresión mostrada en la ecuación (37).

$$\text{Señal servomotor} = (-1) * \text{Señal de control} + 90 \quad (37)$$

Utilizando esta conversión se corrige el comportamiento erróneo del servomotor, de manera que se asegure el funcionamiento eficiente de la planta en su totalidad.

WindUp integral

El problema de "WindUp integral" puede ocurrir en el controlador PID cuando la señal de error es demasiado grande para el controlador, lo que resulta en una integración excesiva y en una acción de control que se aleja del punto de operación óptimo. En el caso de un sistema SISO de nivel de líquido, este problema puede ser especialmente crítico debido a que el sistema es altamente no lineal y está sujeto a fluctuaciones impredecibles en la entrada o en las condiciones ambientales.

Para solucionar el problema de WindUp integral en un controlador PID para este sistema se pueden aplicar diversas técnicas. Una de las técnicas más comunes es la técnica de limitación de la señal de control, que consiste en establecer límites superior e inferior para la señal de control para evitar que el controlador genere una señal de control que exceda los límites del sistema. Esta técnica puede ser efectiva en algunos casos, pero puede resultar en un controlador poco reactivo si se establecen límites demasiado restrictivos.

Otra técnica común para evitar el problema de WindUp integral en un controlador PID para un sistema SISO de nivel de líquido es el uso de la técnica de "Anti-WindUp". Esta técnica se basa en la idea de que el integrador del controlador PID debe ser "cortado" cuando la señal de control está en los límites del sistema. Esto se logra mediante la introducción de una retroalimentación negativa adicional que actúa para limitar la acción integral del controlador. La técnica de Anti-WindUp es especialmente útil en sistemas SISO de nivel de líquido debido a que permite que el controlador mantenga una acción integral sin llegar a los límites del sistema.

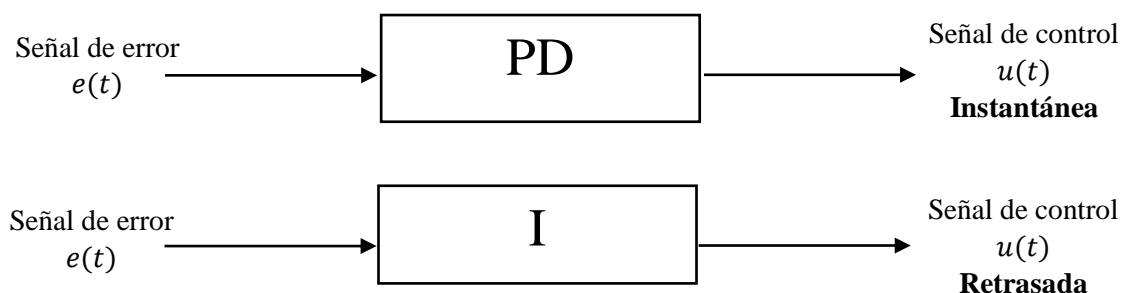


Figura 24. Comportamiento de las acciones PID en un sistema saturado [51]

Se interpreta que el valor de la acción integral tiende a crecer demasiado y sobrecargarse, como consecuencia de esto el controlador tardará en responder a causa de que cuando el proceso se encuentre nuevamente en la banda proporcional deberá esperar a que la acción integral se descargue, conllevando a tener transitorios largos como se observa en la figura 25.

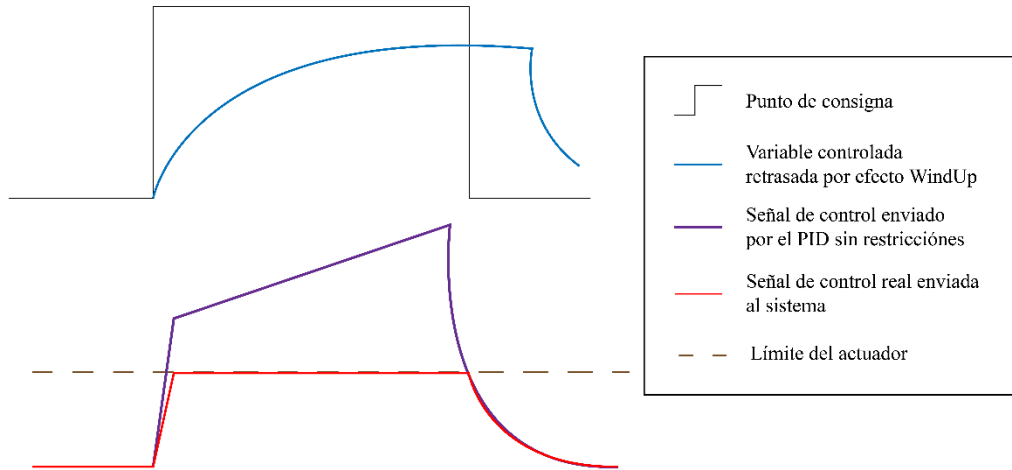


Figura 25. Efecto WindUp [28]

La estrategia Anti-Windup vía descarga de acción integral, aplica un sistema de descarga directo a la acción integral del controlador y se representa esquemáticamente de la siguiente manera.

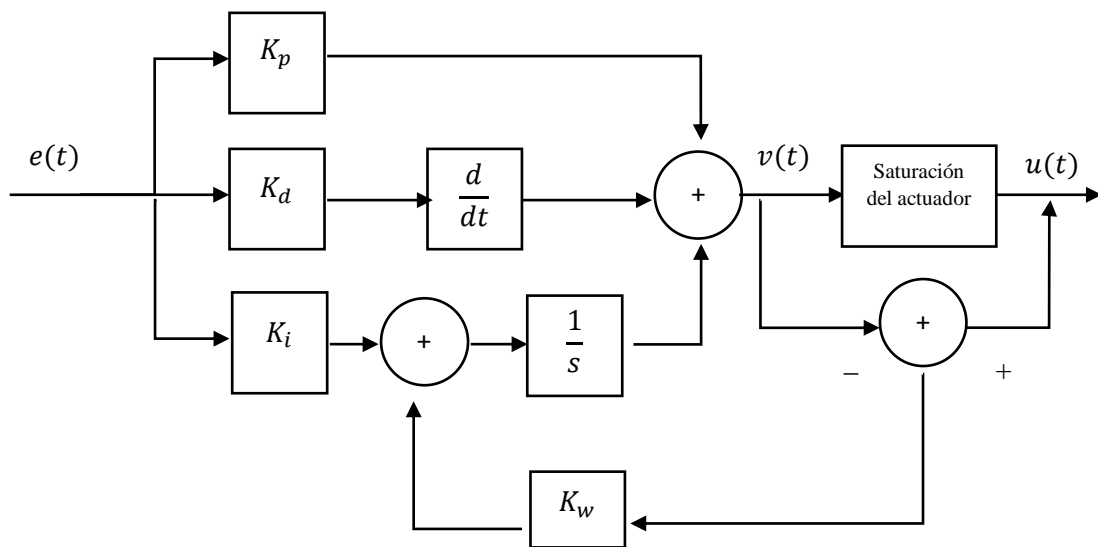


Figura 26. Esquema de mecanismo Anti-Windup de descarga de acción integral [51].

Se aprecia en la Figura 26 la adición de nuevos elementos a la planta, entre ellos una ganancia anti-windup (K_w) como un parámetro a considerar para la sintonía del controlador, esta ganancia se multiplicará con el error de saturación para luego restarse de la acción integradora previniendo su sobrecarga, permitiendo de esta manera obtener

una respuesta más rápida de la acción de control sobre el sistema, esta configuración se representa en la Figura 27.

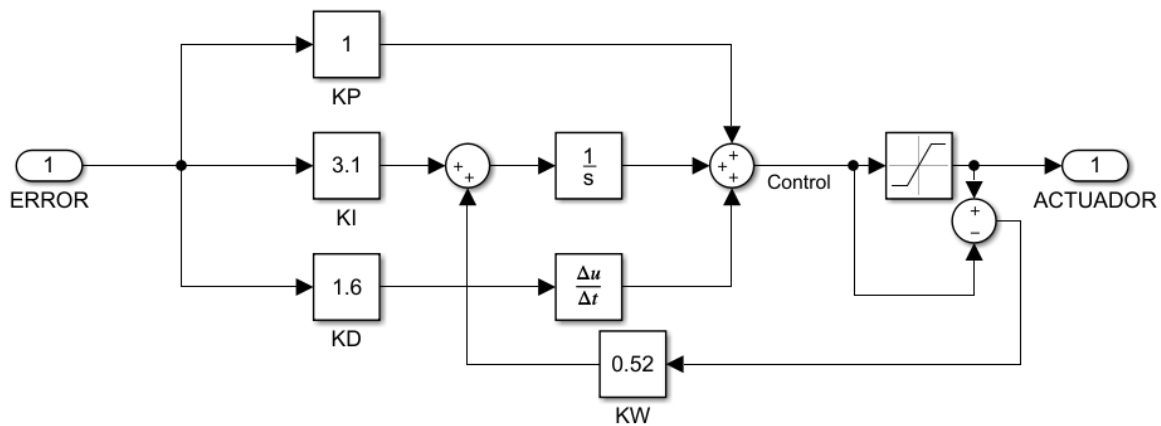


Figura 27. Controlador PID con Anti-WindUp

Corregidas las anomalías presentadas al momento de realizar experimentos en la planta de nivel de líquidos, se plantea un escenario de pruebas para determinar los valores de las constantes P, I, y D, se establece un SETPOINT de 35 centímetros para analizar el proceso.

Coeficientes y comportamiento obtenidos

El uso de este método proporciona los siguientes valores para los coeficientes K_p , K_i , K_d y K_w , mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de control PID obtenidos mediante el método de prueba y error.

COEFICIENTE	VALOR
K_p	1
K_i	3.1
K_d	1.6
K_w	0.52

La configuración obtenida al acoplar el controlador al sistema de nivel de líquidos se presenta en la Figura 28.

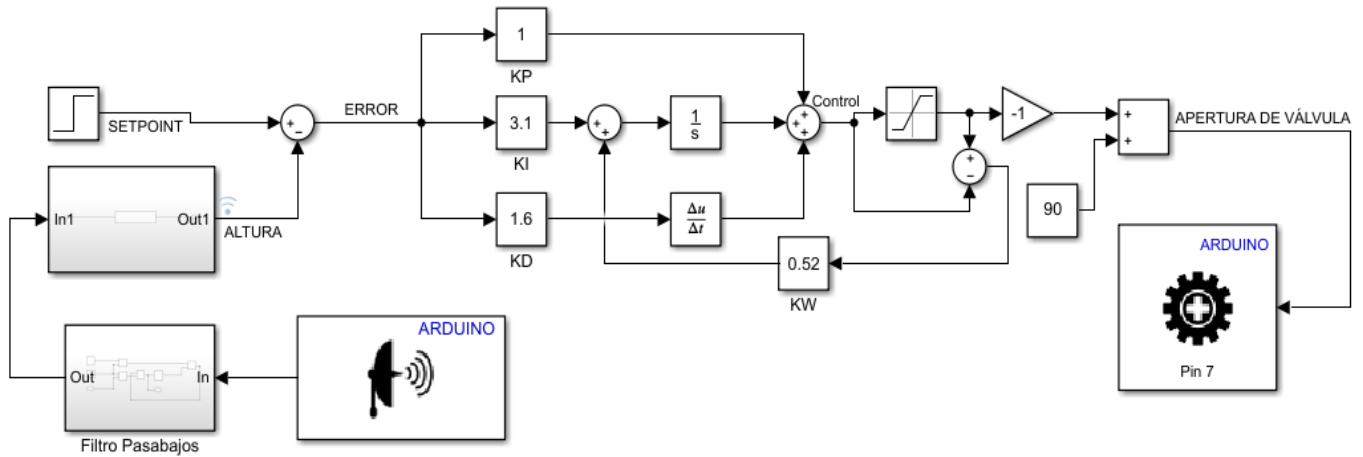


Figura 28. Sistema utilizado para pruebas del controlador PID.

Las pruebas realizadas en este sistema ante el escenario propuesto presentan un comportamiento cercano al requerido, el funcionamiento de los elementos durante la ejecución del proceso se detalla a continuación:

Comportamiento de la salida y de la señal de control

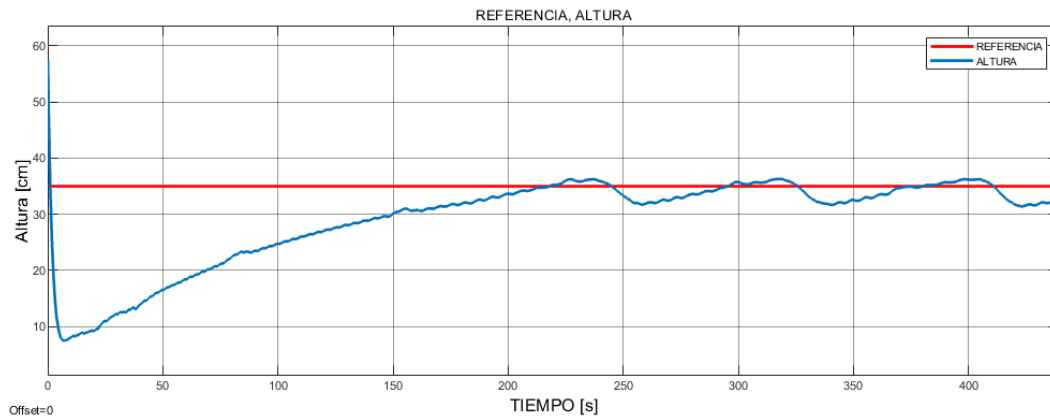


Figura 29. Altura medida durante la ejecución del proceso.

La respuesta obtenida tras la prueba del sistema presenta un comportamiento aproximado al esperado, sin embargo, se observa que el nivel de líquido no llega a un punto de equilibrio durante el proceso (ver figura 29), esto debido a la acción realizada por el controlador, produciendo una apertura y cierre constantes de la válvula (ver Figura 30), por tal motivo, se produce una respuesta oscilatoria con un valor muy cercano a la consigna.

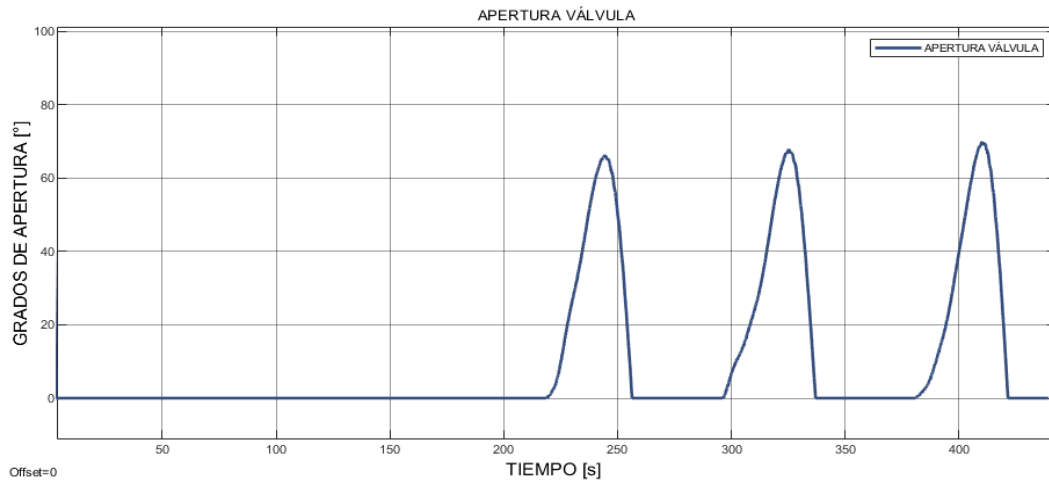


Figura 30. Comportamiento de la señal de control en la apertura y cierre de válvula.

Para complementar y mejorar estas características del controlador se opta por realizar simulaciones utilizando el modelo matemático de la planta acoplándolo a un controlador sintonizado automáticamente en el software de simulación, con el fin de comparar las respuestas obtenidas para posteriormente actualizar el sistema de control.

Se utiliza el método de lugar geométrico de las raíces (LGR) en conjunto de herramientas del software Matlab para obtener los parámetros del control a través del análisis de la respuesta del modelo matemático (Ver Anexo 6), no obstante, se debe tener en consideración las propiedades físicas de los elementos para obtener una respuesta acorde a estas limitaciones en relación a los parámetros del controlador PID.

Realizadas las pruebas correspondientes se determinó que las constantes de control con una respuesta significativa en el proceso son:

Tabla 5. Coeficientes obtenidos en complemento de la herramienta PID Tuner.

COEFICIENTE	VALOR
K_p	13.6357
K_i	0.0787
K_d	37.96
K_w	0.74
α	1.261

Además, los coeficientes de control y el PID Tuner proporcionan un valor de filtro para la acción derivativa (α), para agregar este valor a la acción de control es necesario reescribir la ecuación de control como se expresa la ecuación (38).

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{\alpha \tau_d s + 1} \right) \quad (38)$$

Donde:

- $C(s)$ = Señal de control
- τ_i = Tiempo integrativo
- τ_d =Tiempo derivativo
- K_c = Constante de control (valor de la constante proporcional)

Teniendo en conocimiento los valores de los coeficientes, y aplicando las configuraciones correspondientes se procede a reconfigurar el sistema de control, posteriormente implementa en el software Simulink en conjunto de los elementos físicos como se muestra en la Figura 31.

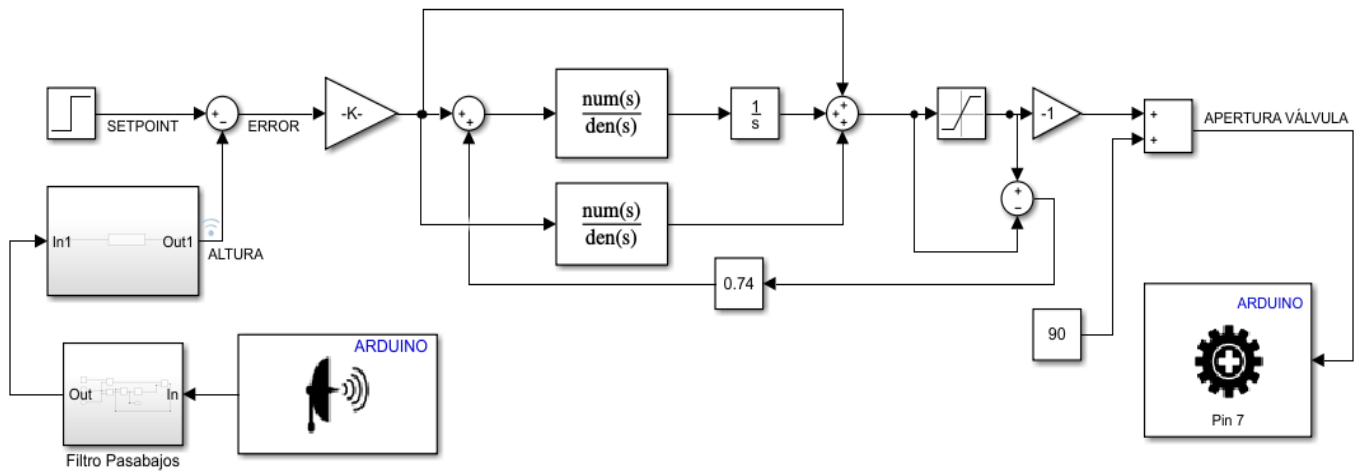


Figura 31. Configuración final de la planta de nivel de líquido, acoplada a un controlador PID

3.2.5 Diseño y desarrollo del controlador MPC

En esta sección se presenta el desarrollo del controlador MPC, describiendo la estrategia que utiliza el controlador y a partir de ella, la configuración realizada en el bloque de control proporcionado por el software de simulación, además, el comportamiento del sistema en general al momento de aplicar este algoritmo de control y sus diversos ajustes.

Ajuste y configuración del sistema de control MPC

Para la implementación de este algoritmo de control al sistema de nivel de líquido se utiliza el bloque controlador MPC proporcionado por el software Simulink presentado en la Figura 32, el cual posee un ambiente de configuración “Toolbox” que permite configurar todos los parámetros a través de escenarios simulados del sistema (Ver Anexo 7).

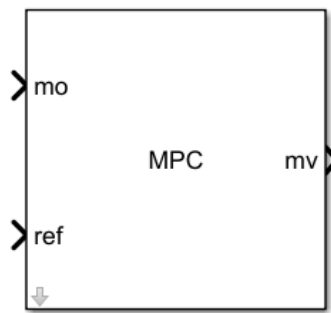


Figura 32. Bloque controlador MPC.

Donde:

- **MO:** Es la salida medida en el sistema a controlar y sirve como realimentación para nuevas estimaciones del controlador.
- **REF:** Es la señal de referencia que recibe el controlador para ejecutar el proceso (SETPOINT).
- **MV:** La variable manipulada en el sistema, generalmente es la señal de control enviada hacia un actuador.

Como primer paso para configurar este bloque de control es necesario acoplarlo al modelo de la planta para obtener el comportamiento tanto de la entrada como de la salida del sistema a través de la linealización automática que provee el ambiente de

configuración del “MPC Toolbox”, se realizan las conexiones del sistema en el software Simulink (ver Figura 33).

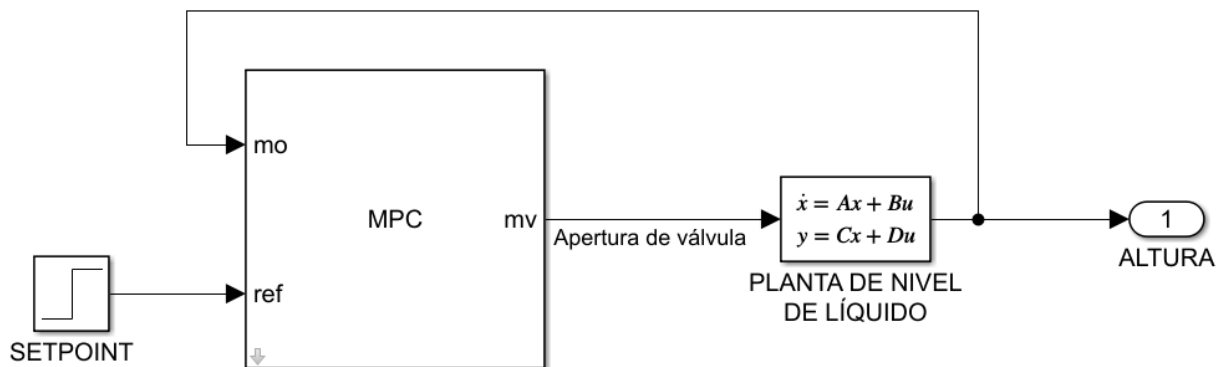


Figura 33. Configuración para la linealización del sistema por parte del controlador.

Realizada la linealización de la planta, el controlador identifica las señales de entrada y salida del sistema, definiendo la estructura de control como se aprecia en la Figura 34, cabe recalcar que este controlador permite el uso de señales como perturbaciones dentro de la estructura de control, no obstante, estas variables no están consideradas dentro del modelado matemático del sistema, por tal motivo, solo se utilizan las señales indicadas en la Figura 34.

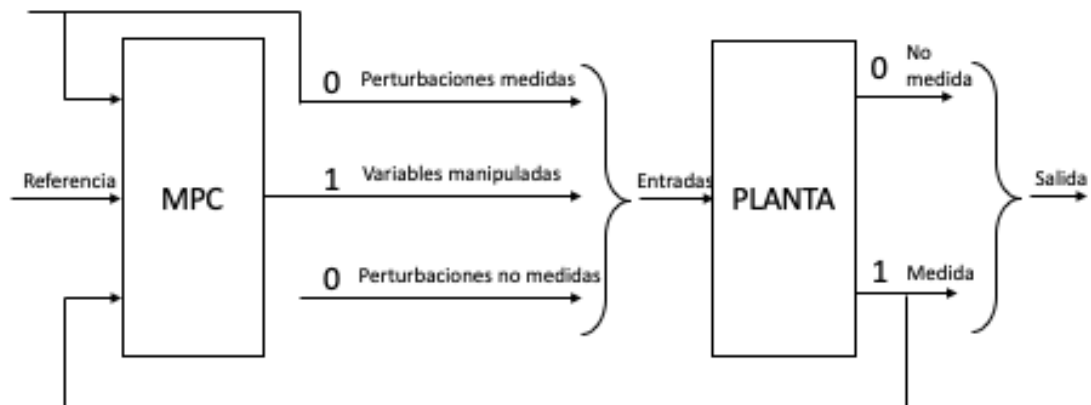


Figura 34. Estructura de control MPC

Conocida la estructura de control de este algoritmo se procede a la simulación de escenarios que proporcionen más información sobre la salida predicha por el controlador para el posterior ajuste de los parámetros en función de las propiedades de los elementos físicos del sistema.

Dentro del ambiente de configuración del controlador, se crea un escenario de simulación acorde al proceso a ejecutar, donde se le asigna una señal de referencia de 35 centímetros y un tiempo de simulación de 500 segundos.

Las señales de entrada y salida obtenidas como resultado de esta simulación poseen un comportamiento alejado de la dinámica conocida del sistema, en la Figura 35 se distinguen sobre picos de gran porcentaje y acciones de control agresivas.

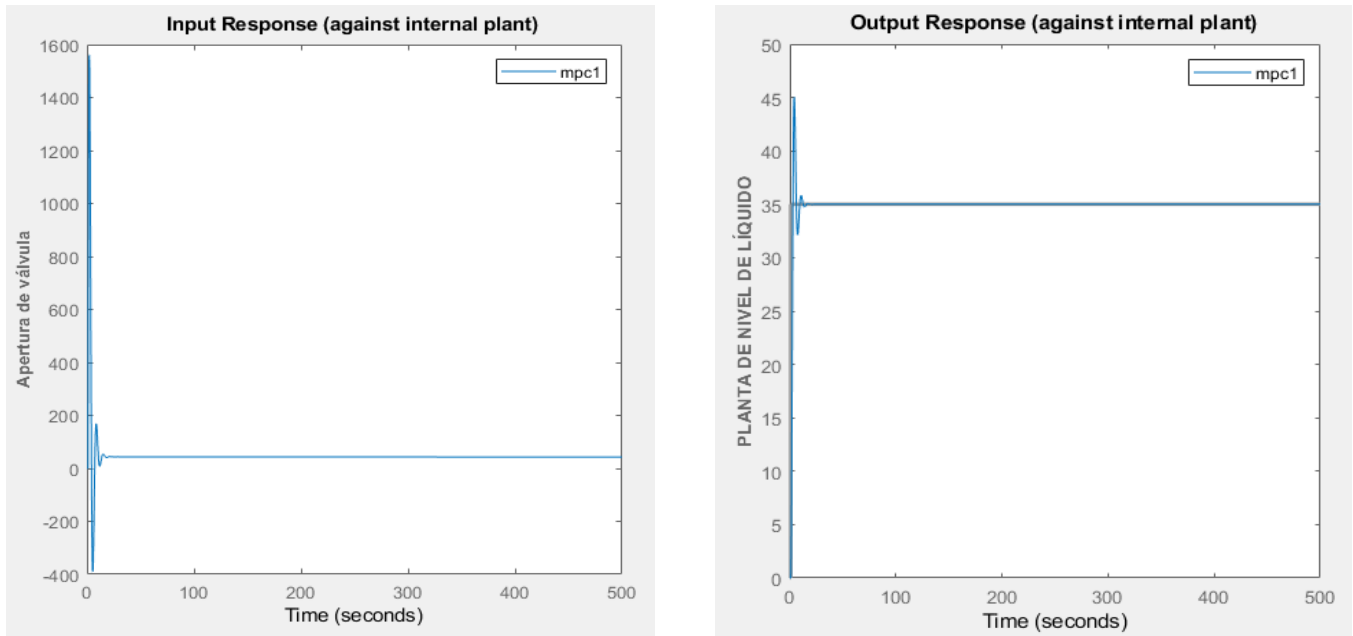


Figura 35. Señales de entrada y salida del sistema linealizadas por el controlador MPC.

Ajuste de parámetros de diseño

Para corregir este comportamiento tanto en la acción de control como en la salida del sistema es necesario ajustar los parámetros de control, de esta manera en complemento del escenario de simulación se establecen valores que aseguren el funcionamiento óptimo del sistema, estos parámetros son:

- **Horizonte de predicción:** Consiste en el número de predicciones de la variable de salida, mientras más grande sea el valor del horizonte de control mayor será el uso de recursos computacionales debido a la cantidad de cálculos realizados por parte del algoritmo de control, por tal motivo es necesario adaptar este parámetro de acuerdo a los elementos físicos utilizados en la propuesta. Para la aplicación del controlador en el sistema se establece

un valor de horizonte de predicción de 150 que abarca significativamente la dinámica del sistema.

- **Horizonte de control:** Comprenden un conjunto de acciones de control futuras que guían el comportamiento de la planta hasta la salida predicha acercándola a la referencia, mientras más bajo sea el horizonte de control menos operaciones se realizarán y la complejidad computacional se disminuirá. En este sistema el valor asignado al horizonte de control es de 2.
- **Tiempo de muestreo:** determina la velocidad con la que el algoritmo de control se ejecuta en el sistema, con un tiempo de muestreo alto la reacción del controlador será ineficiente frente a perturbaciones mientras que para tiempos de muestreo pequeños el controlador podrá lidiar con estas señales rápidamente, no obstante, el uso de tiempos de muestreo demasiado cortos presenta una carga computacional excesiva, el valor utilizado para el tiempo de muestreo es 0.1.

Al aplicar estos ajustes en los parámetros del bloque controlador, se aprecia un cambio significativo en la simulación de la predicción de la salida, así como en la acción de control de la planta (ver Figura 36).

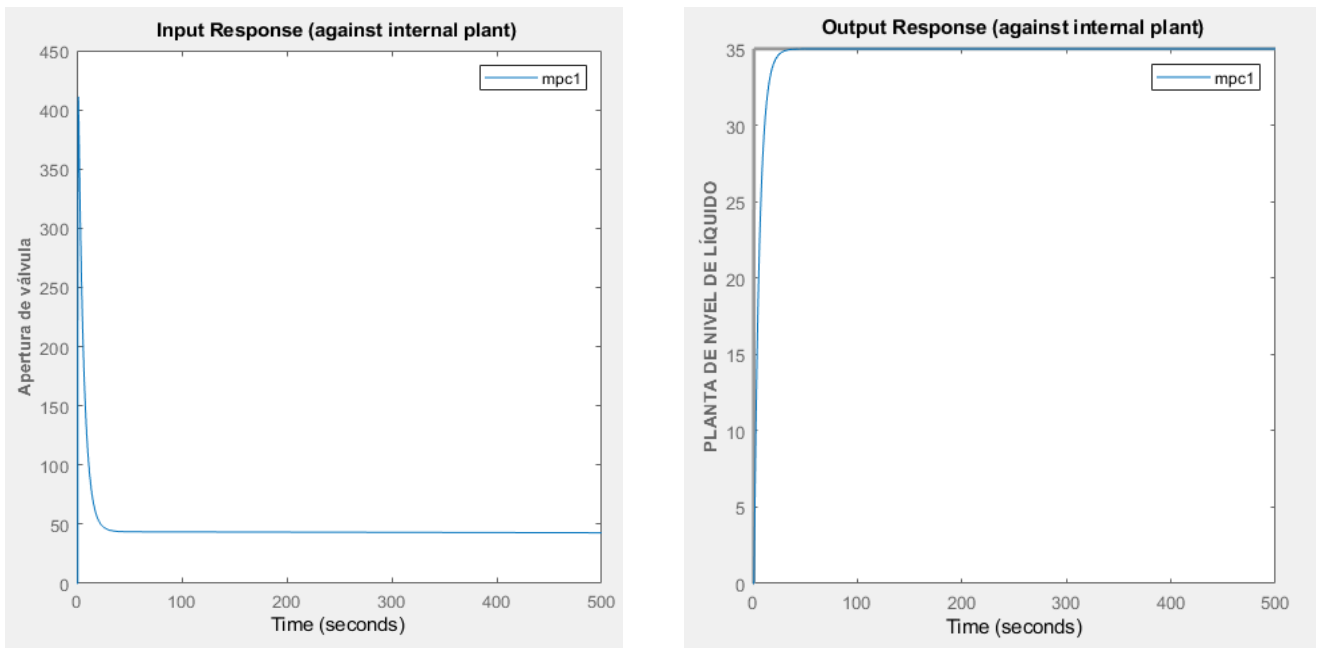


Figura 36. Señales de entrada y salida del sistema aplicando ajustes en los parámetros de diseño.

En la señal de salida se presenta un comportamiento más cercano a la dinámica requerida del sistema, sin embargo, la entrada dada por el controlador posee un sobre pico que se encuentra fuera de los límites físicos del actuador, irregularidad que puede cambiar de manera considerable la dinámica de la planta durante su ejecución, por tal motivo, se deben aplicar reglas que limiten los valores máximos y mínimos de las señales manejadas por el controlador, de tal manera, se pueda operar el sistema acorde a las propiedades físicas de cada uno de los elementos.

Implementación de restricciones

Una de las características que resalta en el controlador MPC es la implementación de restricciones en el algoritmo de control, la aplicación de estos elementos permite limitar la amplitud de las señales que maneja el sistema de tal forma que cumpla con la función establecida respetando las propiedades físicas de los elementos del sistema.

La aplicación de restricción en la amplitud de la señal de control es la consecuencia del comportamiento presentado en la entrada al sistema se decide aplicar este tipo de restricción el cual es muy común debido a su relación con las limitaciones físicas del sistema, esta restricción se aprecia en la ecuación (7).

$$u(\text{minimo}) \leq u(k) \leq u(\text{maximo})$$

Los valores utilizados en la restricción representan el rango máximo y mínimo de giro en la válvula, representándose como:

$$0 \leq u(k) \leq 90$$

Aplicada esta restricción en el sistema, se verifica si afecta de alguna manera al comportamiento de la salida de la planta.

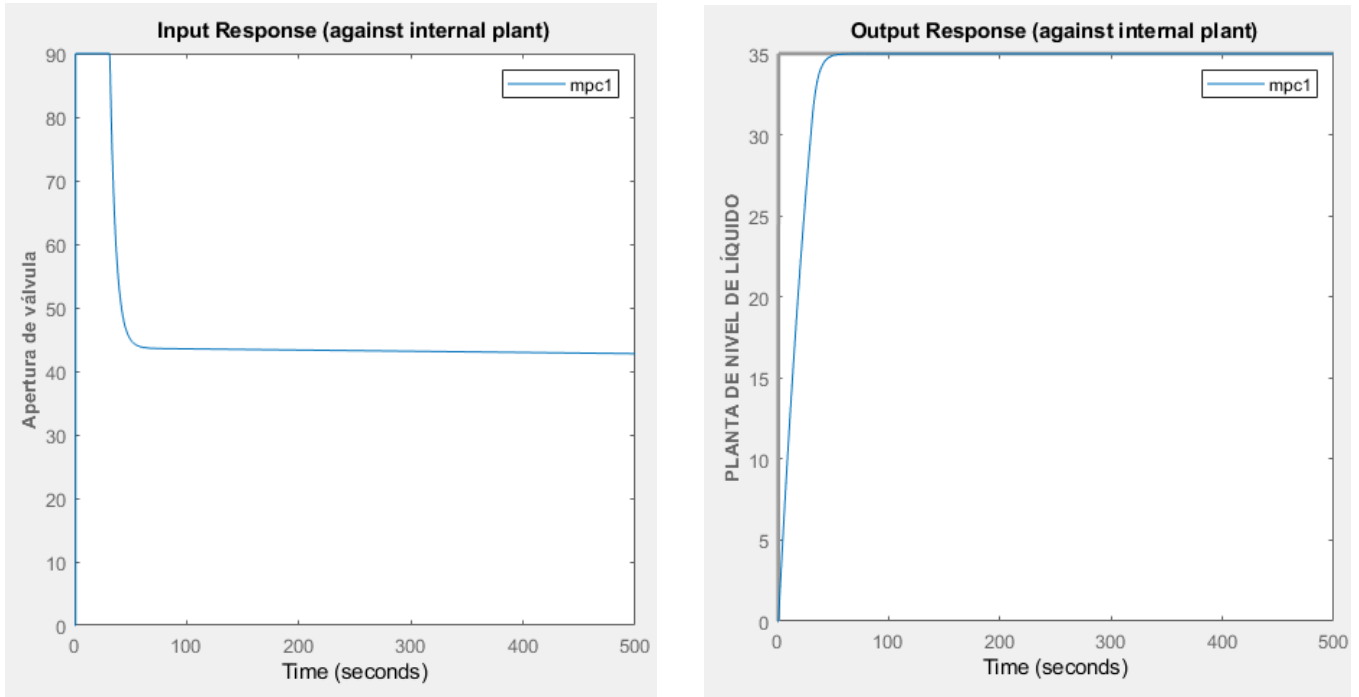


Figura 37. Señales de entrada y salida del sistema aplicando una restricción de amplitud a la entrada.

La Figura 37 muestra una dinámica estable en la salida del sistema a pesar de incluir una restricción en la señal de entrada, por tanto, se interpreta que el controlador está apto para su implementación en la planta física, no obstante, existe la posibilidad de optimizar la respuesta del proceso a través del ajuste de los pesos de las señales de entrada y salida.

Los pesos asignados a estas señales se aprecian en la Tabla 6 y 7.

Entrada del sistema

Tabla 6. Asignación de peso a la señal de control

Variable	Peso	Tasa de peso
Apertura de válvula	0	0.1225

Si se requiere que la variable manipulada este cerca de un valor objetivo el peso se debe incrementar especificando el valor objetivo, en este caso el valor nominal es 0 y no necesita incrementarse, a pesar de ello la tasa de peso tiene un efecto considerable en el comportamiento de la señal de control, pues se puede obtener una respuesta de control más conservadora si se incrementa este valor, o una respuesta más agresiva si se reduce.

Salida del sistema

Tabla 7. Asignación de peso a la señal de control

Variable	Peso
Planta de nivel de líquido	0.4493

El peso asignado a la salida del sistema comprende a un valor específico para mantener el valor de la señal cerca al punto de referencia.

Aplicados estos valores en las señales que interactúan directamente con el control se analiza la respuesta del sistema y se verifica si cumple con el comportamiento requerido, las respuestas de control, así como del sistema se presentan en la Figura 38.

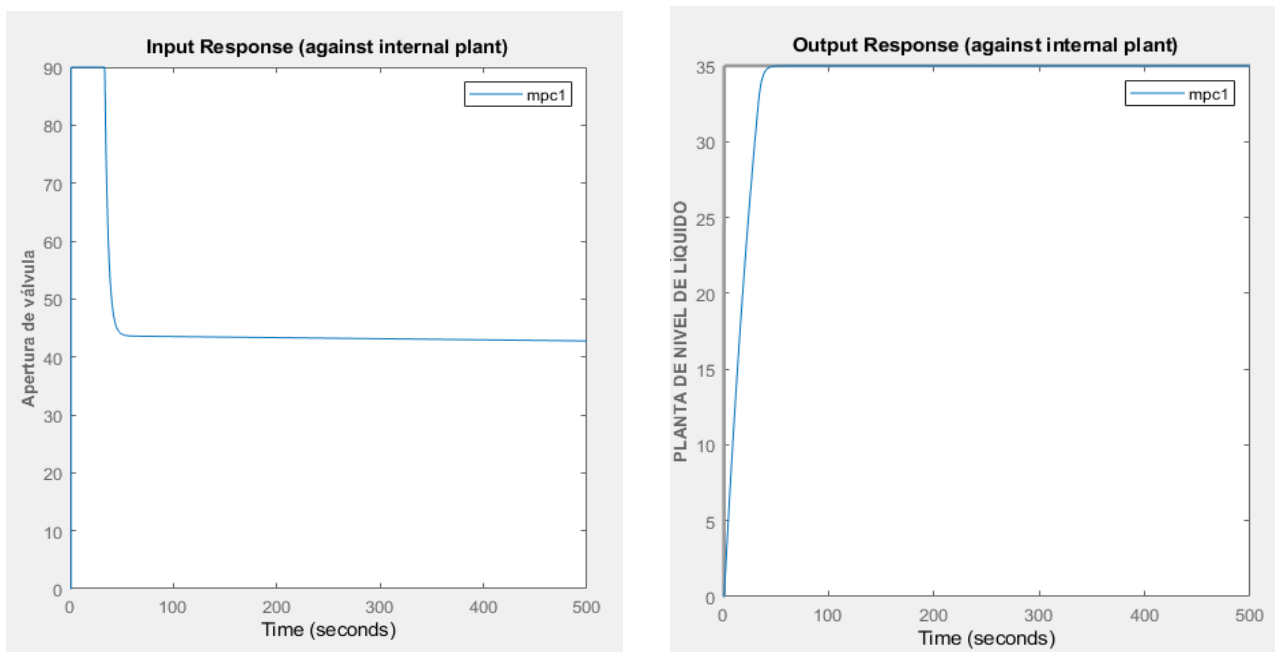


Figura 38. Comportamiento del sistema de control MPC

Verificado el comportamiento del controlador en función de las configuraciones realizadas, se procede a implementarlo en conjunto de los elementos físicos de la planta de nivel de líquido en un esquema de Simulink (ver Figura 39), definiendo sus parámetros de diseño.

Tabla 8. Parámetros de diseño para el controlador MPC

PARAMETRO	VALOR
Horizonte de predicción	150
Horizonte de control	2
Tiempo de muestreo	0.1
Restricción en la señal de control	$0 \leq u(k) \leq 90$
Tasa de peso en la entrada	0.1225
Peso en la salida	0.4493

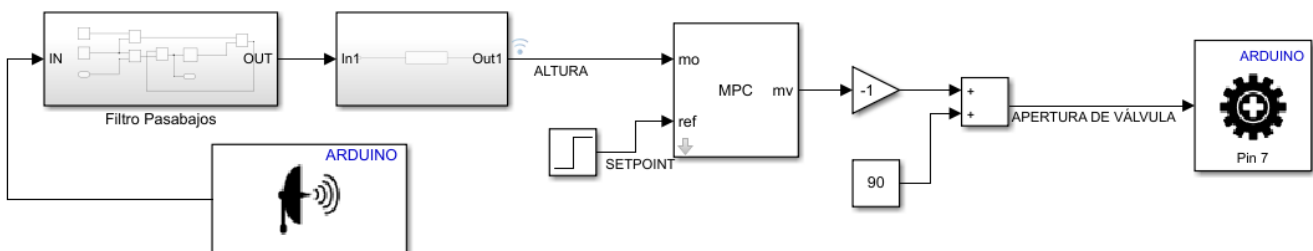


Figura 39. Configuración final de la planta de nivel de líquido acoplada a un sistema de control MPC

3.2.6 Diseño y desarrollo del controlador por RNA

Esta sección presenta el desarrollo del algoritmo de control por redes neuronales artificiales, se describe la técnica para el desarrollo del control utilizado, la identificación del sistema a partir de redes neuronales y la secuencia de entrenamiento de la red.

Desarrollo de algoritmo de control por RNA

La técnica a utilizar en la arquitectura del sistema de control por RNA en la planta de nivel de líquido corresponde al modelo inverso directo, cuyo objetivo es cancelar la dinámica del sistema conectándose en cascada con la planta, siendo la red neuronal una aproximación matemática del inverso del sistema.

La construcción de este sistema de control parte de la identificación de la planta utilizando RNA, con el objetivo de reconocer la dinámica del comportamiento del sistema sin la necesidad de recurrir a la información del proceso [52]. Para ello se establece adquirir los datos pertenecientes a la entrada y salida del sistema en lazo abierto (ver Figura 39).



Figura 40. Diagrama de bloque para el modelado del sistema

Se emplea un modelo dinámico lineal de variables exógenas también conocido como modelo ARX para el entrenamiento de la red [52], esta se conforma de valores pasados tanto de la entrada como de la salida del sistema que utiliza la red para estimar el valor actual de la salida (ver Figura 40).

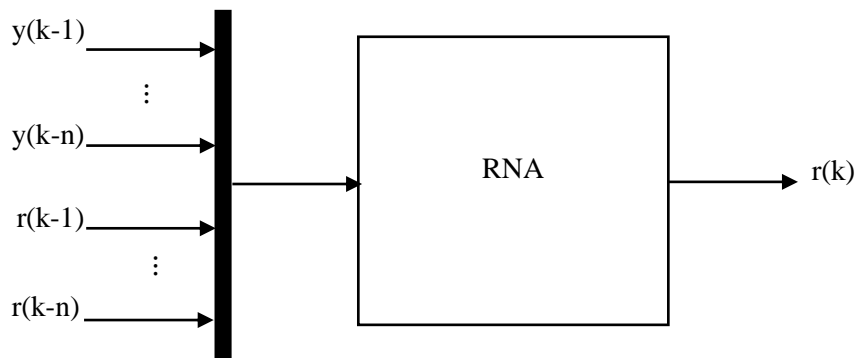


Figura 41. Modelo ARX para la adquisición de datos [52]

Planteada la forma de adquisición de datos y modelado del sistema, se procede a desarrollar el proceso de entrenamiento de la red, para esto:

1. Se establecen las secuencias de entrada y salida del sistema utilizando los datos adquiridos como se muestra en la ecuación (39).

$$\{r_k\}, \{y_k\}, K = 1 \dots N \quad (39)$$

2. Se configura un patrón de entrenamiento conformado por vectores de entrada (x_k) y objetivos t_k como se observa en la ecuación (40).

$$x_k = \begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_k \\ \vdots \\ y_{k-n} \\ r_{k-1} \\ r_{k-2} \\ \vdots \\ r_{k-m} \end{bmatrix} \quad t_k = [r_k] \quad (40)$$

Se determina un regresor de segundo orden para formar el patrón de entrenamiento del sistema, tomando datos de las señales de entrada y salida en el instante de tiempo actual y con retrasos de una y dos instancias en el tiempo, definiendo los vectores de entrada y objetivos de la siguiente forma.

Tabla 9. Entradas y objetivo para el entrenamiento de la red neuronal

Vectores de entrada (x_k)	Objetivo (t_k)
<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de válvula con un retraso de tiempo (r_{k-1}) • Apertura de válvula con dos retrasos de tiempo (x_{k-2}) • Nivel de líquido en el instante actual (y_k) • Nivel de líquido con un retraso de tiempo (y_{k-1}) • Nivel de líquido con dos retrasos de tiempo (y_{k-2}) 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de válvula

3. Se utiliza la herramienta “Neural Network Fitting App” proporcionada por el software Simulink para definir la estructura deseada de la red neuronal, en este entorno se definen características como número de capas ocultas, datos utilizados para entrenamiento/ validación/ testeo, algoritmo de entrenamiento, entre otras (Ver Anexo 8).

La configuración utilizada para el entrenamiento de la red se presenta a continuación, el número de muestras registradas para el entrenamiento es de 50000, donde el mejor resultado se dio al utilizar 8 capas ocultas.

Tabla 10. Parámetros de entrenamiento de la RNA

PARAMETRO	VALOR
Datos usados para entrenamiento	35000 muestras
Datos usados para validación	7500 muestras
Datos usados para testeo	7500 muestras
Número de capas ocultas	8
Algoritmo de entrenamiento	Levenberg-Marquardt

La representación de las propiedades de la RNA al haber aplicado las configuraciones de entrenamiento se puede apreciar en la figura 42.

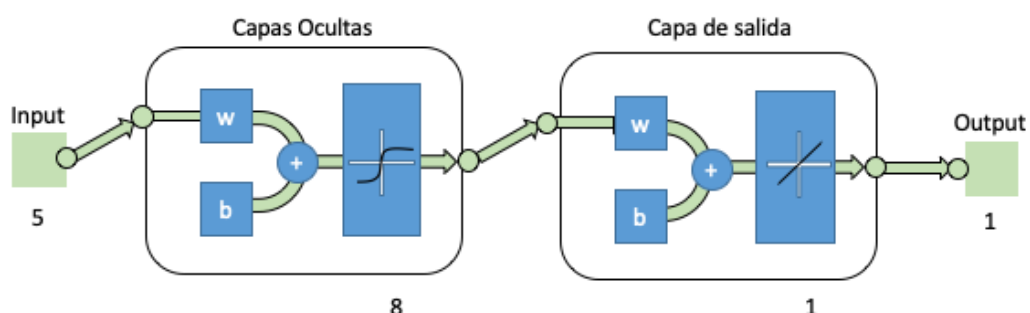


Figura 42. Representación esquemática de la RNA.

Realizado el modelamiento, se procede a implementar la estructura de control del proceso con una red neuronal artificial, la estructura del sistema está establecida de acuerdo a la Figura 43.

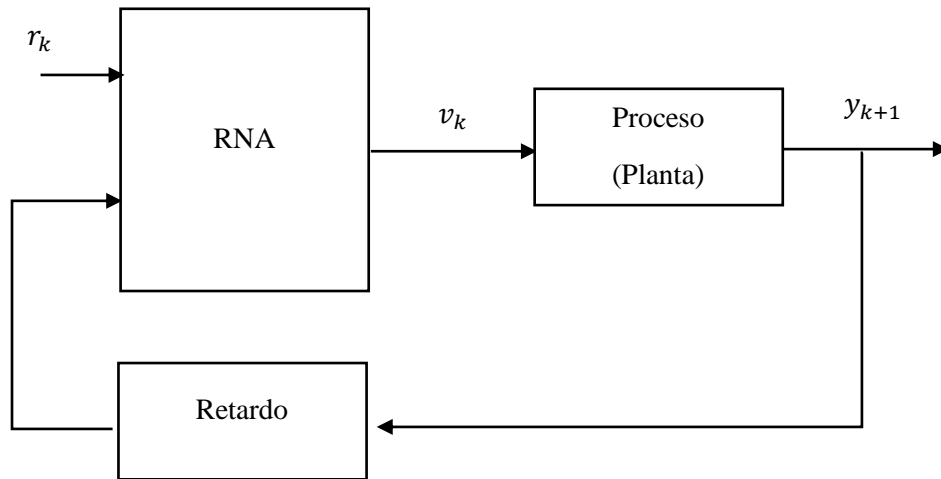


Figura 43. Diagrama de bloques del sistema de control por RNA [10]

El sistema tiene como objetivo obtener una igualdad entre las señales (y_{k+1}) y (r_k), es decir ($y_{k+1} = r_k$), por tal motivo la entrada a la red r_k se sustituye por un valor de referencia logrando que la red suministre la señal de control adecuada v_k .

Se implementa este sistema en el software Simulink (ver Figura 44) utilizando el modelo matemático de la planta para observar el comportamiento del sistema en general, detallando anomalías que puedan generar inconvenientes al momento de aplicarlo en complemento de los elementos físicos.

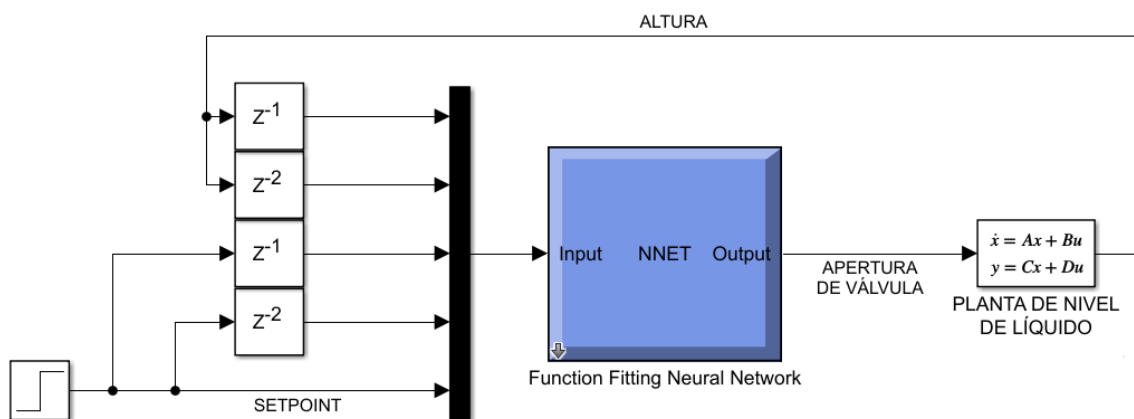


Figura 44. Sistema de control RNA para simulación.

Al verificar las características de cada señal en el sistema de control, se puede apreciar un sobre pico en la señal de control (ver Figura 45) para que la salida se aproxime a una referencia de 35 centímetros, característica que se asume como una irregularidad puesto que sobrepasa los límites físicos del controlador.

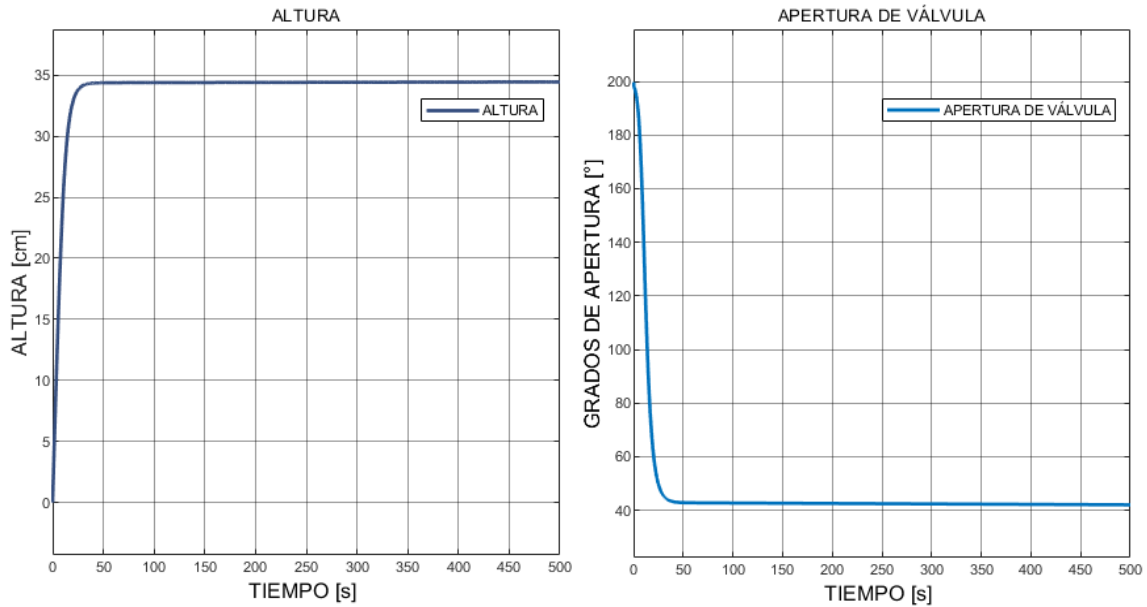


Figura 45. Comportamiento irregular de la entrada en relación a la salida en el sistema de control por RNA.

Para corregir esta acción se incorpora un saturador a la salida del controlador que limite el valor de la señal de control al rango establecido por la lógica de control ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

Aplicando este ajuste al sistema, se aprecia que la señal de salida no posee ninguna variación en su comportamiento y la señal de control ahora trabaja dentro del rango de operación del actuador como se observa en la Figura 46.

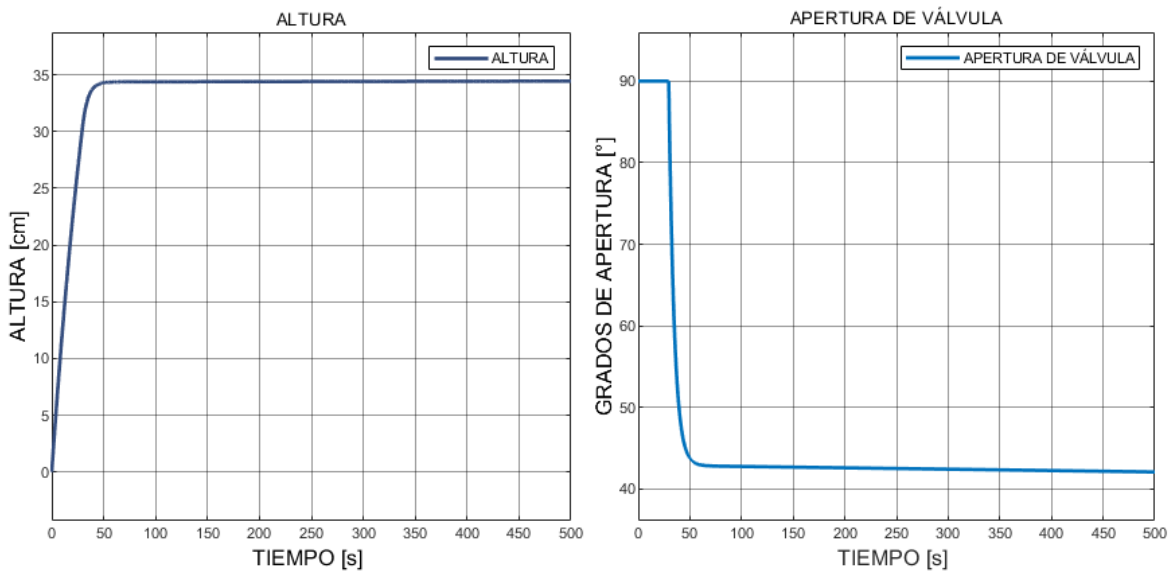


Figura 46. Comportamiento corregido del sistema de control por RNA.

Realizada la verificación del comportamiento del sistema de control mediante simulaciones, se procede a realizar la implementación del controlador sobre la planta de nivel de líquido conectando todos los elementos físicos que componen el sistema, el diseño final se aprecia en la Figura 47.

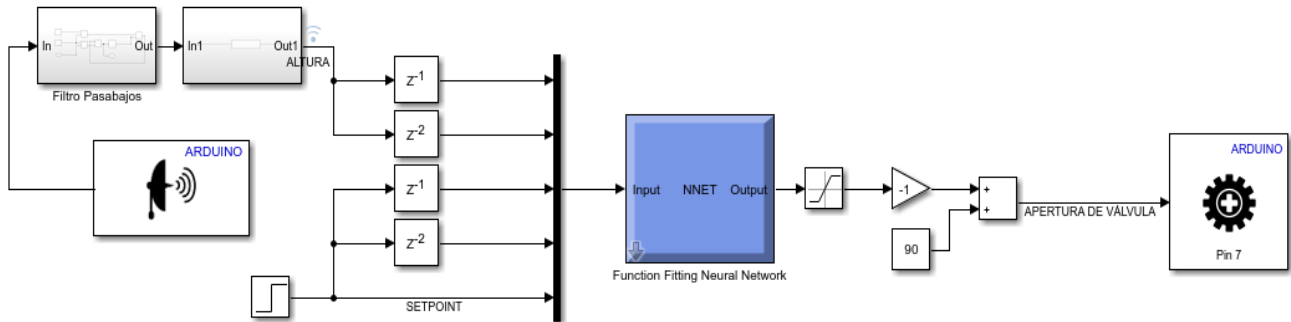


Figura 47. Configuración final de la planta de nivel de líquido acoplada a un control por RNA.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo detalla las pruebas realizadas con cada uno de los controladores acoplados a la planta de nivel de líquido, así mismo se analizan los resultados obtenidos al ejecutar el proceso, comparando las propiedades del comportamiento del sistema a lo largo de su funcionamiento, generando información que incentive optimización de la presente propuesta a través de la investigación de la teoría del control.

4.1. PRUEBAS

Las pruebas realizadas utilizan el entorno gráfico del software Simulink para la ejecución del proceso y análisis en tiempo real de las señales medidas mediante bloques como “Scope”, “display”, entre otros.

4.1.1 EJECUCIÓN DEL CONTROL PID

Para verificar el funcionamiento del controlador PID se establece una referencia de 35 centímetros y un tiempo de ejecución aproximado de 400 segundos, rango de tiempo en el cual se desarrolla satisfactoriamente la dinámica del sistema. Se presentan gráficas de las señales que interactúan en el sistema tomadas durante la ejecución del proceso, apreciando su comportamiento dinámico

Comportamiento de la salida del sistema al acoplar el controlador PID

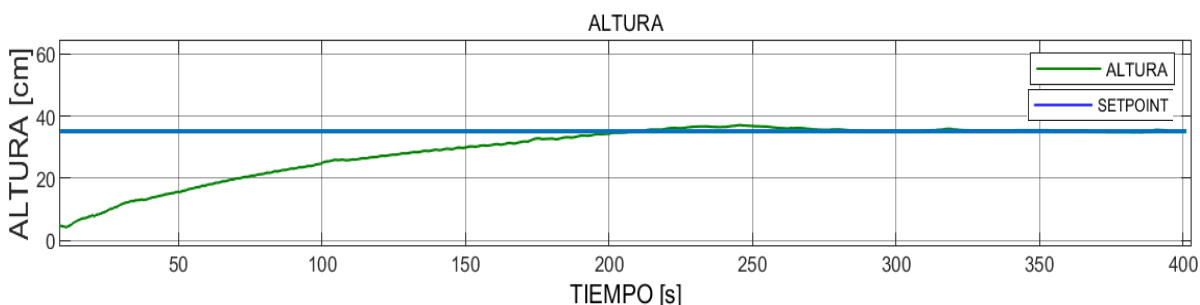


Figura 48. Comportamiento dinámico de la salida del sistema utilizando un controlador PID

En la dinámica obtenida mediante la ejecución del proceso del sistema de nivel de líquido acoplado al controlador PID desarrollado (Ver Figura 48) se observa que la altura

del líquido en el tanque llega al nivel deseado dado por la referencia y se logra mantener en el mismo a lo largo del tiempo, por tal motivo, se deduce que el sistema en su totalidad cumple con los parámetros establecidos en la presente propuesta.

Comportamiento de la señal de control PID

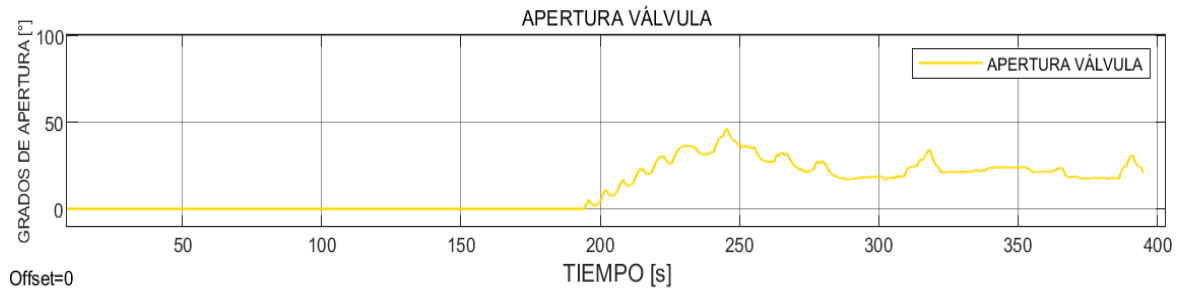


Figura 49. Comportamiento de la señal del controlador PID

De manera general se puede apreciar que el controlador PID realiza la acción de control cuando el valor de la variable controlada se aproxima al punto de referencia, manipulando la apertura y cierre de la válvula para conseguir que el nivel de líquido se mantenga en el valor ajustado (Ver Figura 49).

4.1.2 EJECUCIÓN DEL CONTROL PID CON EFECTO WINDUP

Una irregularidad común en los sistemas de control PID es la sobrecarga de la acción integral, causando un retraso en la acción de control y, por lo tanto, una respuesta errónea en la salida del sistema, a continuación, se muestra el comportamiento de la planta al ser afectada por esta anomalía.

Comportamiento de la salida del sistema al acoplar el controlador PID afectado por WindUP

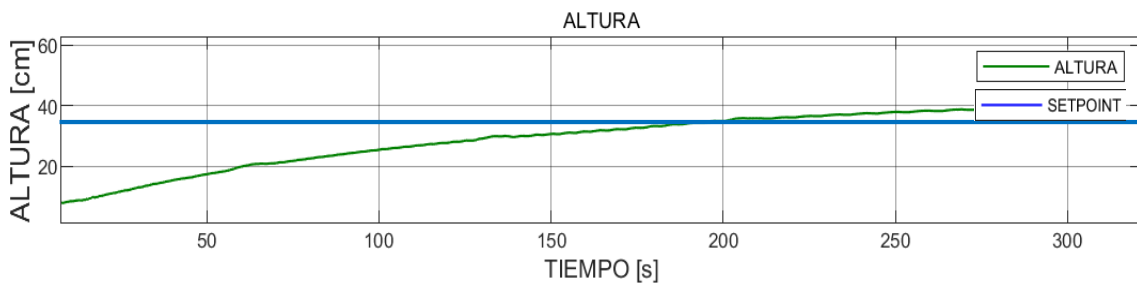


Figura 50. Comportamiento de la planta con efecto WindUp

Este tipo de controlador, al no estar configurado tomando en consideración los elementos que componen el sistema y sus propiedades, se obtendrá una respuesta errónea en la salida del sistema, en este caso, el sistema no se estabilizará en la referencia establecida (Ver Figura 50), provocando que la planta sea propensa a averiarse al no controlar los elementos de interés.

Comportamiento de la señal de control PID con efecto WindUp

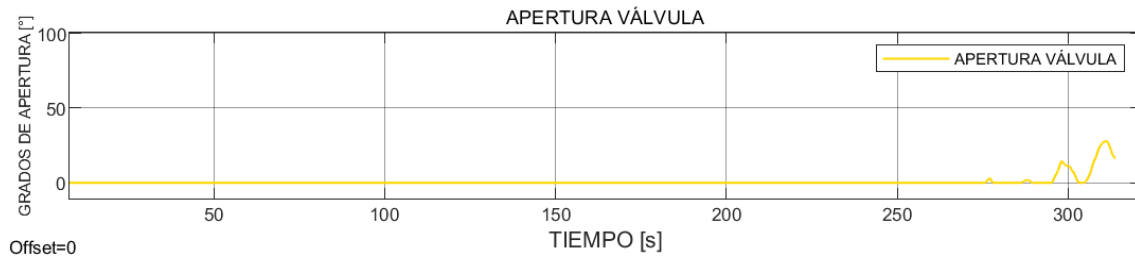


Figura 51. Señal de control retrasada por efecto WindUp

Las respuestas del sistema apreciadas en las figuras 50 y 51 muestran a la planta actuando similarmente a un sistema de lazo abierto a consecuencia de la continua posición de apertura de la válvula provocada por el retraso en la señal de control, a causa de esto el nivel de líquido en el tanque crecerá constantemente alejándose de la referencia.

4.1.3 EJECUCIÓN DEL CONTROLADOR MPC

De forma análoga al análisis anterior, se establece un punto de referencia en 35 centímetros para la ejecución del proceso en la planta durante un periodo aproximado de 400 segundos para verificar el comportamiento dinámico del sistema, se presentan las gráficas correspondientes en las siguientes secciones.

Comportamiento de la salida del sistema al acoplar el controlador MPC

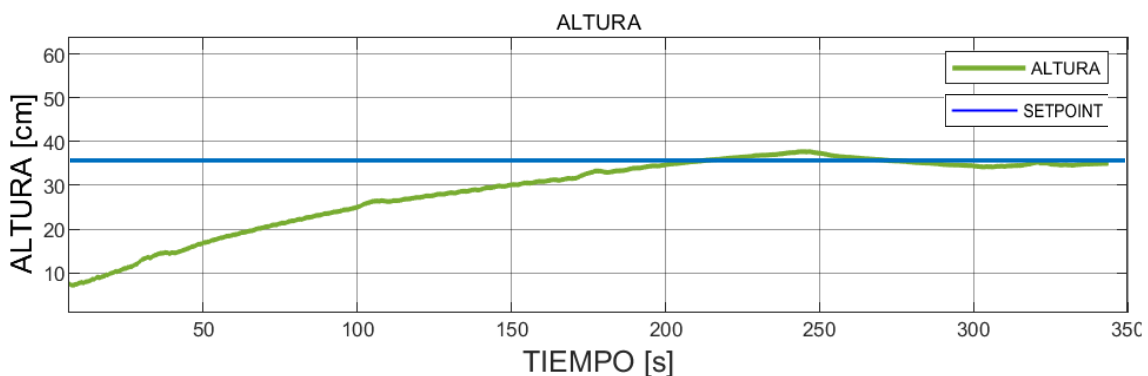


Figura 52. Comportamiento dinámico de la salida del sistema utilizando un controlador MPC.

El comportamiento dinámico del sistema al acoplarse un controlador MPC, es similar a cuando se usa un controlador PID, sin embargo, puede presentar una respuesta más agresiva al momento de aproximarse a la referencia, ocasionando sobre picos en la salida que posteriormente serán corregidos por el mismo control, manteniendo estable el sistema.

Comportamiento de la señal de control MPC

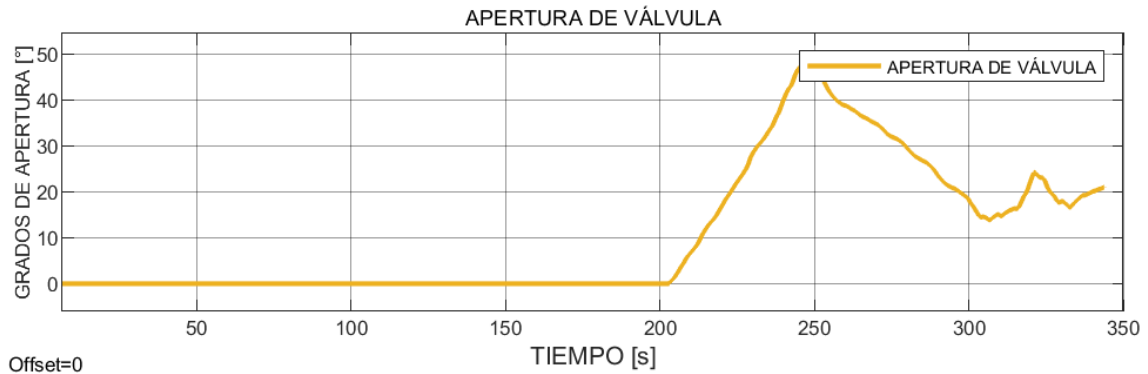


Figura 53. Comportamiento de la señal del controlador MPC

El comportamiento de la señal del controlador MPC es descrito en la figura 53, se logra que el controlador proporcione una respuesta más rápida y lineal como consecuencia del ajuste de pesos en las señales del sistema, causando que la salida posea una dinámica agresiva al momento de aproximarse al punto de ajuste.

4.1.4 EJECUCIÓN DEL CONTROLADOR POR RNA

Las pruebas realizadas para el sistema de nivel de líquido acoplado a un controlador por redes neuronales artificiales se desarrollan de forma similar a los controladores ya analizados, estableciendo un punto de consigna de 35 centímetros para el nivel de líquido en el tanque.

Comportamiento de la salida del sistema al acoplar el controlador RNA

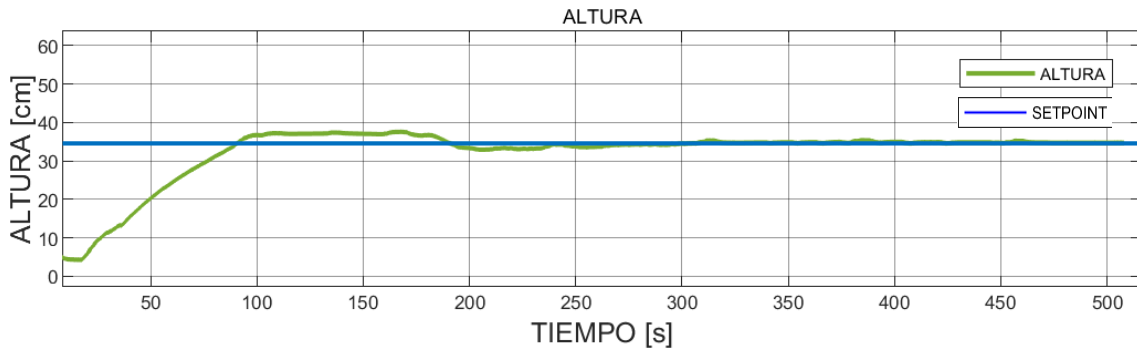


Figura 54. Comportamiento dinámico de la salida del sistema utilizando un controlador por RNA.

En el sistema de nivel de líquido junto al control RNA, proveen una dinámica más rápida a la planta (Ver Figura 54), ocasionando que el sistema se estabilice en menor tiempo considerando los demás controladores, no obstante, se debe considerar que este controlador basa su funcionamiento en datos recopilados usados en el entrenamiento, por tal motivo, cualquier acción que sea diferente a los recopilados puede afectar de forma significativa al sistema.

Comportamiento de la señal de control RNA



Figura 55. Comportamiento de la señal del controlador MPC

Al observar la Figura 55, se determina que la planta de nivel de líquido en complemento de un control por redes neuronales artificiales posee una respuesta considerablemente más rápida que los demás sistemas de control analizados en este proyecto, también se observa que la señal que controla la apertura de la válvula posee un comportamiento proporcional a la dinámica del sistema provocando una mejor aproximación a la consigna establecida.

4.2. ANALISIS DE RESULTADOS Y COMPARATIVA

Respuestas del sistema obtenidas ante la aplicación de controladores

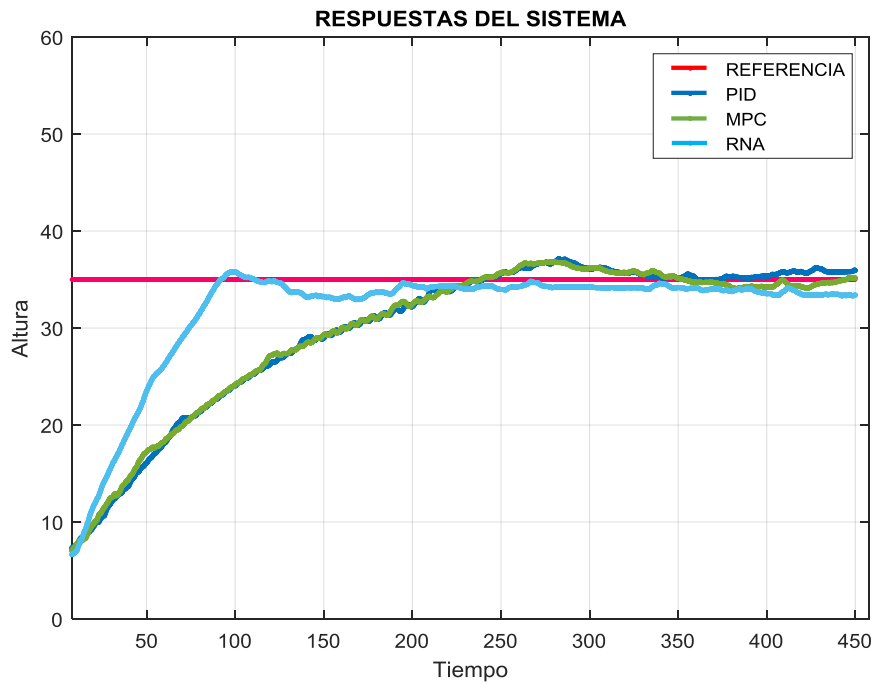


Figura 56. Señales de respuesta del sistema ante la aplicación de los tres tipos de control

En la Figura 56 se aprecian las señales de respuesta del sistema frente a la aplicación de los algoritmos de control PID, MPC y RNA, determinando las características del comportamiento de la planta en conjunto del controlador al aproximarse a una referencia establecida. Se puede observar un comportamiento similar en el sistema controlado por PID, así como MPC, mientras que el control por RNA presenta un mejor desempeño en cuanto al tiempo y estabilidad de respuesta.

Señales de control obtenidas en la ejecución del proceso

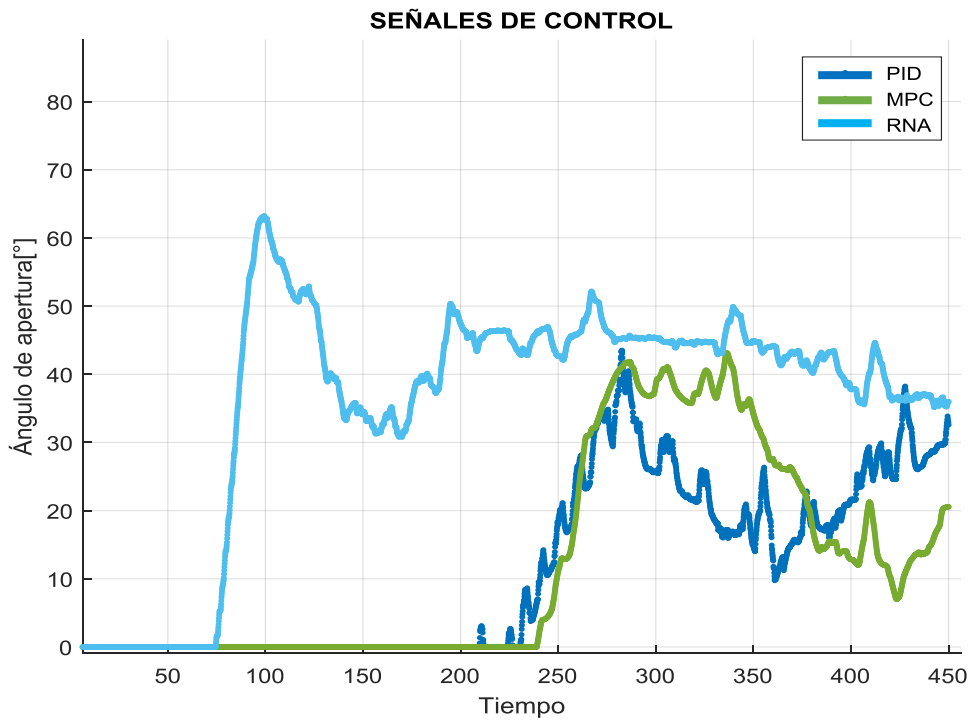


Figura 57. Señales aplicadas al sistema por los tres tipos de control

La figura 57 presenta las señales de control proporcionadas al sistema durante la ejecución del proceso, esta señal se relaciona directamente con la acción de apertura y cierre de la válvula de control, de esta manera se garantiza que el nivel de líquido se mantenga en el valor establecido por la referencia, se aprecia una reacción temprana y significativa por parte del control por RNA ocasionando que la respuesta del sistema tenga un comportamiento más conservador, por otro lado, los controladores PID y MPC reaccionan cuando el valor de la variable controlada se encuentra muy cerca de la referencia.

Señales de error obtenidas en la ejecución del proceso

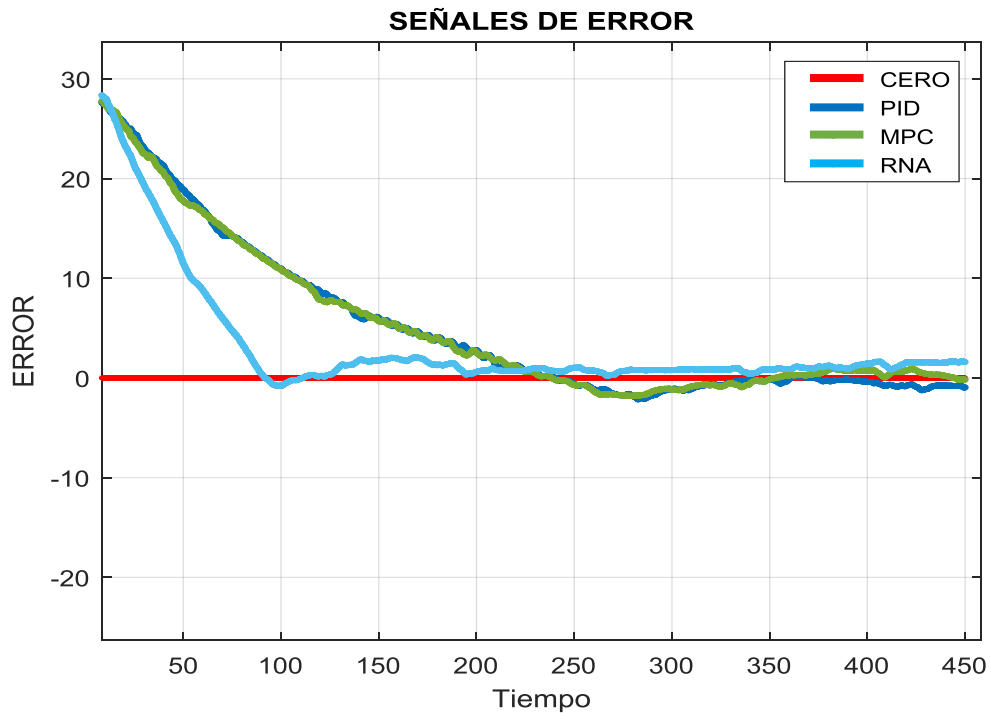


Figura 58. Señales de error obtenidas en la ejecución del sistema en conjunto de los controladores PID, MPC y RNA

Se observa en la Figura 58 la representación de las señales de error del sistema durante su estado transitorio hasta su aproximación a la referencia, de manera general y análoga a la respuesta del sistema, el controlador por RNA establece un error aproximado a cero más rápido que los controladores MPC y PID que tardan más en reducir el valor del error al poseer un comportamiento similar.

A partir de las pruebas realizadas en cada uno de los controladores estudiados se definen las siguientes características:

Tabla 11. Características de la dinámica de la planta para cada controlador

CARACTERISTICAS DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA				
CONTROL	Sobre impulso máximo	Tiempo de establecimiento	Altura en estado estacionario	Error en estado estacionario
PID	37,10 cm (6%)	270 segundos	≈34.96 cm	0.11%
MPC	37,67 cm (7.62%)	268 segundos	≈34.78 cm	0.63%
RNA	35,8 cm (2.28%)	210 segundos	≈34.83 cm	0.48%

En la Tabla 11 se pueden apreciar los valores aproximados de los parámetros obtenidos a través de pruebas experimentales, estos valores definen el comportamiento de la dinámica del sistema al acoplarse con cada controlador, estas propiedades se analizan en cada sistema con el fin de establecer el controlador que genera mejores resultados en la ejecución del proceso de la presente propuesta tecnológica.

Sobre impulso máximo

En el análisis de la respuesta transitoria de cada sistema se puede observar que todas poseen sobre impulso debido a que sobrepasan el valor objetivo (referencia) en un tiempo determinado, el valor de este parámetro varía dependiendo de la construcción y características del controlador.

La señal de respuesta de la planta de nivel en conjunto del controlador PID rebasa el punto de ajuste en 2,10 cm dando un porcentaje de sobre impulso del 6%, de la misma manera, en el control MPC se puede observar un comportamiento más agresivo en la salida de 2,67 cm que exceden los 35 cm de la señal de referencia dando un porcentaje de 7.62%, mientras que con el control RNA a diferencia de los demás controladores la respuesta de este sistema posee un sobre pico de menor impacto con 0.8 cm lo que equivale a 2.28%.

El impacto del sobre impulso en este sistema no afecta negativamente el rendimiento del proceso debido a los elementos utilizados y arquitectura de la planta, no obstante, en

ambientes industriales y fabriles existen condiciones donde la precisión es un factor fundamental, por ende, en esos casos se debe implementar controladores que no tengan niveles altos de sobre impulso o en su mejor caso no exista. En la presente propuesta el controlador que dispone de esta característica es el RNA con un nivel de sobrepico del 2.28%.

Tiempo de establecimiento

El tiempo de establecimiento en la respuesta de un sistema está dado en el transcurso de la ejecución desde que se aplica una entrada hasta que la señal de salida haya alcanzado y mantenido un valor especificado.

En este análisis se debe considerar que la ejecución del proceso en la planta es lenta debido a las propiedades físicas de sus componentes y condiciones de trabajo, en este caso una referencia de nivel del líquido establecida en 35 cm. Para alcanzar y mantener el nivel establecido el controlador PID tarda un aproximado de 270 segundos, el controlador MPC logra que el proceso se estabilice 268 segundos, mientras que el control por RNA estabiliza el proceso en 210 segundos.

El tiempo de establecimiento de un proceso es fundamental para optimizar la producción final en una industria, sin embargo, estos dependen de las propiedades físicas y recursos disponibles para lograrlo, una ejecución rápida de un proceso no necesariamente significa que sea optimo, debido a que debe existir un balance entre todos los parámetros del sistema para que el producto final sea el deseado. En la presente propuesta, el controlador que provee de un mejor tiempo de establecimiento al sistema sin alterar los demás parámetros del proceso es el controlador por RNA con 210 segundos.

Altura y error en estado estacionario

La altura en estado estacionario es la variable fundamental de este proceso, verificando el valor de la variable controlada y comparándola con la referencia establecida en 35 cm se comprueba la efectividad del controlador.

El nivel de líquido en estado estable utilizando el control PID para las condiciones experimentales dadas es de 34.96 cm dando un error del 0.11%, la altura estable del líquido mediante el uso del controlador MPC es de 34.78 cm teniendo un error del 0.63%, mientras que con el controlador por RNA el sistema se estabiliza a una altura de 34.83 cm que en comparación de la referencia se obtiene un error del 0.48%.

Estos parámetros del sistema en estado estable indican que el controlador PID provee de una mejor aproximación de la respuesta del sistema a la referencia dada, sin embargo, las señales de error tanto del controlador MPC como del RNA, no se alejan del punto de ajuste y pueden ser consideradas como válidas para la implementación en el sistema.

Observaciones

Considerando el análisis a los parámetros más importantes de la ejecución del proceso junto de cada sistema de control, se puede determinar que el controlador por RNA provee al sistema de un comportamiento eficiente, con un sobrepico aproximado del 2%, un tiempo de establecimiento de 210 segundos y una altura en estado estable de 34.83 cm, que a pesar de ser menor al del control PID, posee un mejor rendimiento debido a sus demás parámetros y el balance que le proveen al sistema, no obstante, se reconoce que este sistema es apto y viable dentro del ambiente experimental en el cual se ha desarrollado e implementado, por tanto, su uso en sistemas más robustos en el campo de la industria y/o investigación pueden venir acompañadas de una necesidad de recursos para poder implementar este tipo de controladores.

Los controladores PID y MPC también ofrecen estabilidad en el sistema y un comportamiento viable, sin embargo, en el caso del MPC la mayor parte de sus parámetros consumen una gran cantidad de recursos computacionales al igual que el controlador por RNA, de la misma manera representa una opción en este caso de estudio, mientras que, para procesos industriales la disposición de estos recursos requiere de una inversión alta y con resultados de poco impacto respecto a los actuales métodos de control. El control PID pese a ser uno de los controladores más usados y convenientes, es poco útil frente a procesos de mayor complejidad que requieren de sistemas de control mas robustos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En el desarrollo e implementación de un controlador MPC para el sistema de nivel de líquido se logró obtener una respuesta estable y viable para el proceso contando con un error en estado estacionario de 0.63% en un tiempo aproximado de 268 segundos, sin embargo, la mayor parte de los parámetros de configuración del control consumen recursos computacionales, por lo cual, se tuvo que encontrar el balance entre consumo de recursos y eficiencia de control que asegura una correcta ejecución del proceso.

La construcción del algoritmo de control PID y su funcionamiento al acoplarse al sistema de nivel de líquido presento un comportamiento aceptable y la respuesta en estado estable con mayor aproximación al punto de referencia con una altura de 34.96 centímetros, no obstante, se deben tomar en cuenta parámetros de diseño y configuraciones específicas que aseguren la correcta ejecución del proceso y de esta manera optimizar el sistema.

El control por redes neuronales artificiales provee al sistema de nivel de líquido una respuesta más rápida y dinámica que los demás sistemas de control al establecer la señal al punto de referencia en 210 segundos, el diseño de este controlador utiliza entradas y salidas tanto en tiempo presente y pasado pueden estimar de manera más eficiente una señal de control y otorgar una salida más eficiente.

La comparativa de los tres sistemas de control establecieron al controlador por RNA como el más eficiente para implementarse en el sistema propuesto en este trabajo de titulación, no obstante, los recursos que conlleva implementar este tipo de controladores en ambientes industriales puede ser contraproducente en relación a los beneficios que puede traer, por lo cual, para procesos similares no tan complejos existen alternativas como MPC o PID que proveen estabilidad y una respuesta eficiente al sistema.

La implementación de tres algoritmos de control en la presente propuesta da apertura al uso de teoría de control clásico y moderno como piezas fundamentales en los procesos presentes en la industria y/o en la investigación científica, efectuando métodos, así como configurando parámetros principales para su diseño, que desemboca en la optimización de procesos y desarrollo de nuevos sistemas de control.

Recomendaciones

El desarrollo de controladores automáticos puede considerarse superficial cuando se ve desde un punto de vista netamente teórico, debido a que no se toman en cuenta aspectos físicos que pueden afectar considerablemente al sistema, por tal motivo, para la construcción de algoritmos de control se debe tener a disposición de equipos correctamente calibrados y especializados para comprobar la eficiencia y viabilidad de un controlador.

En base a pruebas realizadas con los controladores desarrollados para la presente propuesta, se destaca al control por RNA al presentar propiedades que conllevan a mejores resultados en la ejecución del proceso, por lo cual, se recomienda tomar en consideración la identificación de los recursos necesarios, así como de los métodos para implementar este controlador a diversos procesos con fines industriales o investigativos.

El uso de software especializado para el desarrollo y configuración de controladores es de vital importancia, generalmente se utilizan elementos externos que necesitan de extensiones computacionales para conectarse en el sistema, para que los elementos físicos que conforman el sistema puedan comunicarse y funcionar de manera correcta es necesario que el software cuente con licencia autorizada para su uso y así acceder libremente a todas sus herramientas.

Referencias Bibliográficas

- [1] María Aracelia Alcorta García, «IMPACTO DEL CONTROL AUTOMÁTICO E INTELIGENCIA ARTIFICIAL – Ciencia UANL», 2019. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=9193> (accedido 19 de noviembre de 2022).
- [2] A. Maxim, D. Copot, C. Copot, y C. M. Ionescu, «The 5W's for Control as Part of Industry 4.0: Why, What, Where, Who, and When—A PID and MPC Control Perspective», *Inventions*, vol. 4, n.º 1, p. 10, feb. 2019, doi: 10.3390/inventions4010010.
- [3] «3. Breve Historia DE LA Teoría DEL Control (Maikel Torres PiÑeiro) - Breve Historia de la Teoría de - Studocu». <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-guadalajara/control/3-breve-historia-de-la-teoria-del-control-maikel-torres-pineiro/3009749> (accedido 27 de diciembre de 2022).
- [4] V. M. Hernández Velásquez y M. B. Alvarado Bawab, «Control on-off de temperatura y potencia para el mejoramiento de las condiciones de procesos asistidos con microondas», *INGE CUC*, vol. 13, n.º 2, pp. 53-59, jul. 2017, doi: 10.17981/ingecuc.13.2.2017.06.
- [5] M. E. A. Pérez, V. H. B. Baltazar, y J. H. P. Ramírez, «Análisis comparativo entre un Método Experimental vs. uno Analítico, de Diseño de Controladores tipo P, PI y PID para un Sistema de Proceso Industrial», *Pist. Educ.*, vol. 35, n.º 108, Art. n.º 108, may 2018, Accedido: 27 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1375>
- [6] <https://www.virtualpro.co>, «Control predictivo multivariable : evolución histórica y conceptos», *VirtualPro.co*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/control-predictivo-multivariable-evolucion-historica-y-conceptos> (accedido 27 de diciembre de 2022).
- [7] E. Hernández-Arroyo, J. L. Díaz-Rodríguez, y O. Pinzón-Ardila, «Estudio del comportamiento de un Control MPC [Control Predictivo Basado en el Modelo] comparado con un Control PID en una Planta de Temperatura», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 23, n.º 37, p. 45, jul. 2014, doi: 10.19053/01211129.2789.
- [8] D. F. Sendoya, «¿Qué es el Control Predictivo y Hacia Dónde se Proyecta?», *Publicaciones E Investig.*, vol. 7, p. 53, jun. 2013, doi: 10.22490/25394088.1106.

- [9] D. G. C. Salvador Ernesto Núñez Flores, Roberto Ramírez García, Julio César Romero, «Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones en beneficio humano», *Ciencia UNAM*. <https://ciencia.unam.mx/leer/773/redes-neuronales-artificiales-contribuyen-en-el-desarrollo-de-aplicaciones-en-beneficio-humano> (accedido 27 de diciembre de 2022).
- [10] S. Lucas, E. Portillo, A. Zubizarreta, y I. Cabanes, «Entrenamiento supervisado de redes neuronales de impulsos», presentado en XLIII Jornadas de Automática, 2022, pp. 216-223. Accedido: 27 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/31382>
- [11] «Redes y control - REDES NEURONALES MULTIMODELO APLICADAS AL CONTROL DE SISTEMAS Memòria del projecte - Studocu». <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-politecnico-nacional/control-inteligente/redes-y-control/10282686> (accedido 27 de diciembre de 2022).
- [12] E. D. Mañay, M. D. Chiliquinga, J. E. I. Lza, H. E. Y. Ugsha, y P. S. Castillo, «Diseño por simulación de un control Fuzzy y MPC para un proceso de nivel», *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 6, n.º 1, Art. n.º 1, feb. 2022, doi: 10.37811/cl_rcm.v6i1.1621.
- [13] R. Fuentes, «ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE CONTROL PID Y DIFUSO», ene. 1999.
- [14] J. D. Luis Delgado, «Análisis y Diseño de Algoritmos de Control Discreto de Sistemas MIMO Lineales y No Lineales Aplicando Técnicas de Control de Estructura Variable», phd, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2015. Accedido: 27 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/39861/>
- [15] W. A. Khan, L. Wisniewski, D. Lang, y J. Jasperneite, «Analysis of the requirements for offering industrie 4.0 applications as a cloud service», en *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh, UK, jun. 2017, pp. 1181-1188. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001413.
- [16] Manyika, James; Chui, Michael; Miremadi Mehdi; Bughin Jacques; George, katy; Willmott, Paul; Dewhurst, Martin, «Un Futuro que Funciona: Automatización, Empleo Y Productividad.» McKinsey&Company, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/digital%20disruptio>

n/harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/a-future-that-works-executive-summary-spanish-mgi-march-24-2017.pdf

[17] World Bank Group, *World Development Report 2016: Digital Dividends*. Washington, DC: World Bank, 2016. doi: 10.1596/978-1-4648-0671-1.

[18] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, y C. Zhang, «Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination», *Comput. Netw.*, vol. 101, pp. 158-168, jun. 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2015.12.017.

[19] Cristhian Fabricio Caicedo Coro, «IMPORTANCIA DEL USO DE DEL SISTEMA SCADA PARA EL DESARROLLO EMPRESARIAL.», Santo Domingo-Ecuador, 2019.

[20] J. P. Cardona, J. J. Leal, J. E. Ustariz, J. P. Cardona, J. J. Leal, y J. E. Ustariz, «Modelado matemático de caja blanca y negra en educación en ingeniería», *Form. Univ.*, vol. 13, n.º 6, pp. 105-118, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-50062020000600105.

[21] P. N. Roldán, «Modelo matemático - Definición, qué es y concepto», *Economipedia*. <https://economipedia.com/definiciones/modelo-matematico.html> (accedido 24 de noviembre de 2022).

[22] I. E. Sanchez, «DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RETROALIMENTADO DE CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE», p. 131.

[23] Kasuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 3ra Edición. MADRID: PRENTICE HALL, 1998.

[24] A. Terrones, J. Enoc, P. Peláez, y E. Eduardo, «TESIS Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico», p. 89.

[25] G. A. Alfaro Rosas, «Modelamiento y diseño de un sistema de control de las variables críticas de un molino semiautógeno mediante un sistema experto basado en control MPC y lógica difusa», dic. 2021, Accedido: 22 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21199>

- [26] L. M. Martínez Gómez, «Optimización de un controlador MPC mediante algoritmos metaheurísticos», 2021, Accedido: 22 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/49511>
- [27] Y. Yao y D. K. Shekhar, «State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field», *Build. Environ.*, vol. 200, p. 107952, ago. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107952.
- [28] R. C. B. Rego, «Controle mpc robusto com anti-windup aplicado a sistemas lpv e ltv baseado no algoritmo quasi-min-max com relaxação em lmis», jul. 2019, Accedido: 6 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ufersa.edu.br//handle/prefix/6969>
- [29] J. González Hernández, E. Rodríguez Miranda, J. L. Guzmán, M. Berenguel, y G. Ación, «Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel», presentado en XLII Jornadas de Automática, 2021, pp. 301-308. Accedido: 6 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/28326>
- [30] H. Astudillo Roblero, J. Gallardo Arancibia, C. Ayala Bravo, H. Astudillo Roblero, J. Gallardo Arancibia, y C. Ayala Bravo, «Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico», *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 28, n.º 4, pp. 612-628, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-33052020000400612.
- [31] «CONTROLADOR PID.pdf». Accedido: 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.acomee.com.mx/clasificaciones/CONTROLADOR%20PID.pdf>
- [32] A. E. Repetur, «Redes neuronales artificiales», ago. 2019, Accedido: 23 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ridaa.unicen.edu.ar/handle/123456789/2058>
- [33] J. E. Sierra-García y M. Santos, «Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas», *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 18, n.º 4, Art. n.º 4, sep. 2021, doi: 10.4995/riai.2021.16111.
- [34] W. Rivas-Asanza, B. Mazon-Olivo, y F. Mejia, «Capítulo 1: Generalidades de las redes neuronales artificiales», 2018, pp. 11-35.

- [35] Xavier Alvarez Brotons, «Capítulo 2. Sistemas de Control». 2004. [En línea]. Disponible en: upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5
- [36] Personal de Lab-Volt, *Flúidos y Sensores*, Primera edición. Quebec: Lab-Volt Ltda., 2001. [En línea]. Disponible en: biblio.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/ManualesIng/FluidosySensores-O.pdf
- [37] Leonel Germán Corona Ramirez, Griselda Stephany Abarca Jimenez, y Jesús Mares Carreño, *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial Patria, 2014.
- [38] Eugenio Vidósola C., «ACTUADORES». Soltex Chile S.A. [En línea]. Disponible en: academia.edu/29303028/Actuadores_1_
- [39] Mario Alberto Perez, Analía Perez Hidalgo, y Elisa Perez Berenguer, «INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO». 2007. [En línea]. Disponible en: dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unida1y2.pdf
- [40] R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*, 1a ed. México: Prentice Hall, 2010.
- [41] Blas Zamora Parra; Antonio Viedma Robles, *Máquinas Hidráulicas- Teoría y problemas*, Primera edición. Cartagena-Colombia: rai UPCT, 2016.
- [42] «Características de las válvulas de bola – STHexpert». <https://sthexpert.standardhidraulica.com/caracteristicas-de-las-valvulas-de-bola/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [43] T. Guillermo, J. C. Cobos, y M. A. Chiluisa, *Microcontroladores*. PRODUCCIÓN DOCENTES UCE, 2022. Accedido: 5 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://librosdigitales.uce.edu.ec/index.php/PDU/catalog/book/8>
- [44] «¿Qué es un sensor ultrasónico? | Fundamentos del sensor: Guía de sensores para fábricas clasificados por principios | KEYENCE». <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/> (accedido 5 de marzo de 2023).

- [45] aula21, «Qué es un Servomotor, para qué sirve y cómo funciona», *aula21 / Formación para la Industria*, 19 de diciembre de 2019. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [46] G. Barrios y O. Julian, «Control predictivo basado en frecuencia fija aplicado al accionamiento eléctrico de cinco fases», Thesis, Universidad Nacional de Asunción, 2017. Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspacecicco.conacyt.gov.py/jspui/handle/123456789/42782>
- [47] E. Tlachi Cuanenemi, «Algoritmo de control predictivo aplicado a el control de nivel de líquido de un sistema de 4 tanques acoplados», jul. 2018, Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/7626>
- [48] A. W. Suquillo Gualotuña, «Diseño de un control predictivo basado en modelo (MPC) para un inversor de potencia monofásico, aplicado a un generador fotovoltaico», bachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control., 2019. Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/15792>
- [49] M. E. Zarei, «Model Predictive Control (MPC) for the Power Converters for Renewable Energy Generation Systems with Switch Fault Tolerance Capability», phd, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2019. Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/57183/>
- [50] B. Valadez Hernández, «Control de modelo predictivo (MPC) No-lineal para una columna petlyuk: Cosimulación Matlab-Aspen», feb. 2022, Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/7508>
- [51] J. E. Rodríguez-Castellanos M. Sc., J. E. Cote-Ballesteros M. Sc., J. E. Rodríguez-Castellanos M. Sc., y J. E. Cote-Ballesteros M. Sc., «Estrategia anti-windup por recálculo y seguimiento en controladores PID difusos directos», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 28, n.º 53, pp. 119-139, dic. 2019, doi: 10.19053/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9925.
- [52] J. J. Lara, S. Cantillo, y J. A. López, «Modeling and Control of a Two Tank System Using Artificial Neural Networks», en *2019 IEEE Colombian Conference on*

Applications in Computational Intelligence (ColCACI), jun. 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ColCACI.2019.8781977.

ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas de la bomba MKII

Tabla 12. Especificaciones técnicas de bomba magnética MKII.

Especificaciones Técnicas	
Dimensiones	1.72 Kg
Capacidad máxima	19 L/min
Dimensiones	9.5x 5.5x 5.2''
Polos	2
Voltaje	110 ~ 120 V CA
Frecuencia	50 ~ 60 Hz
Potencia	25 W
Corriente	0.1 A
Velocidad	3000 RPM
Ciclo de trabajo	Continuo
Capacitor	1 μ F
Tipo de aislamiento	B
Dimensiones E/S	1/2''
Resistencia al agua	IPX2

Anexo 2: Especificaciones técnicas de Arduino MEGA-2560

Tabla 13. Especificaciones técnicas de Arduino MEGA-2560

Especificaciones Técnicas	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V

Pines digitales E/S	54 (14 proporcionan salidas PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente CC por pin de E/S	40 mA
Corriente CC por pin de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8KB son usadas por gestor de arranque)
SRAM	8 KB
E EPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Anexo 3: Especificaciones técnicas de Servomotor MG-995

Tabla 14. Especificaciones técnicas de servomotor MG-995

Especificaciones Técnicas	
Peso	55 g
Dimensiones	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Par de parada	8.5 kgf.cm (4.8V), 10 kgf.cm (6 V)
Ángulo de rotación	120° (+-60 desde el centro)
Velocidad de operación	0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
Voltaje de operación	4.8 V a 7.2 V
Engranajes	Metálicos de larga duración
Rango de temperatura	0 °C – 55°C

Anexo 4: Especificaciones técnicas de Sensor de distancia HC-SR04

Tabla 15. Especificaciones técnicas de sensor ultrasónico HC-SR04

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de alimentación	+5V CC
Corriente de reposo	< 2mA
Corriente de trabajo	15mA
Ángulo efectivo	< 15°
Rango de distancia	2 – 400 cm
Resolución	0.3 cm

Angulo de medición	30°
Ancho de pulso en la entrada de Trigger	10µs
Dimensiones	45 x 20 x 25 mm
Peso	10 g

Anexo 5: Ambiente de trabajo Toolbox System Identification

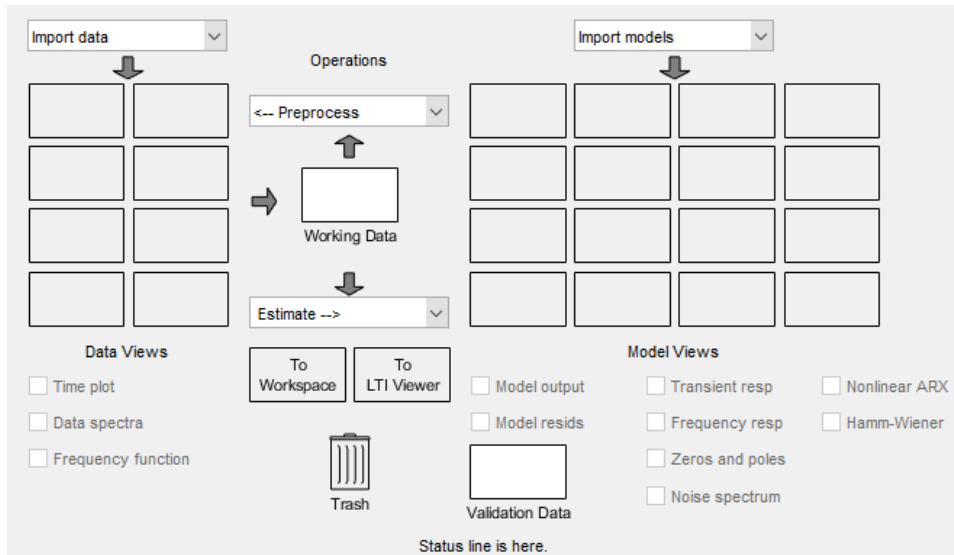


Figura 59. Toolbox System Identification

Anexo 6: Ambiente de trabajo PID Tuner

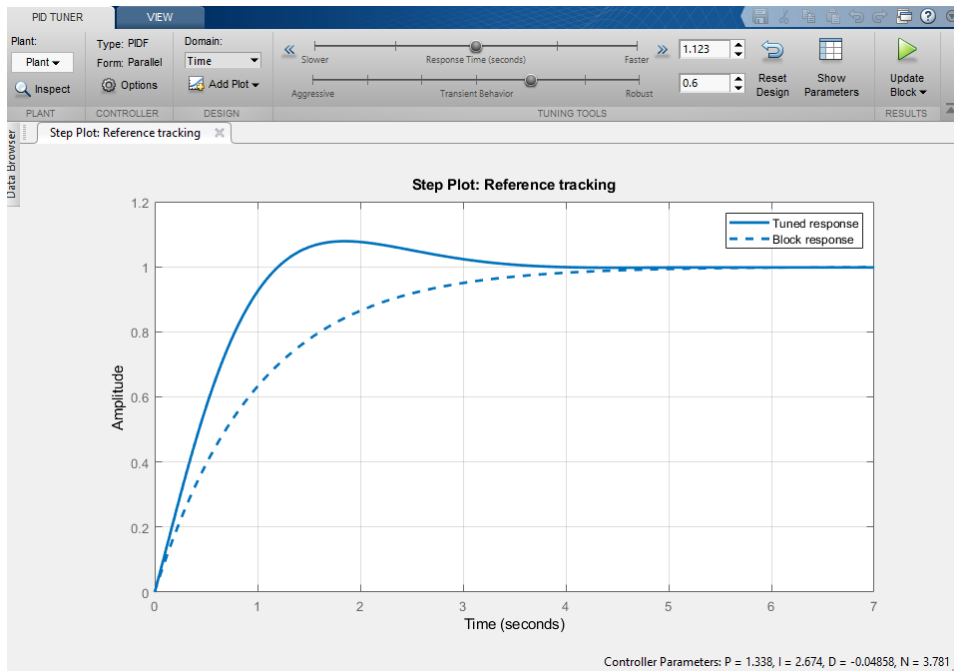


Figura 60. PID Tuner

Anexo 7: Ambiente de trabajo MPC Toolbox

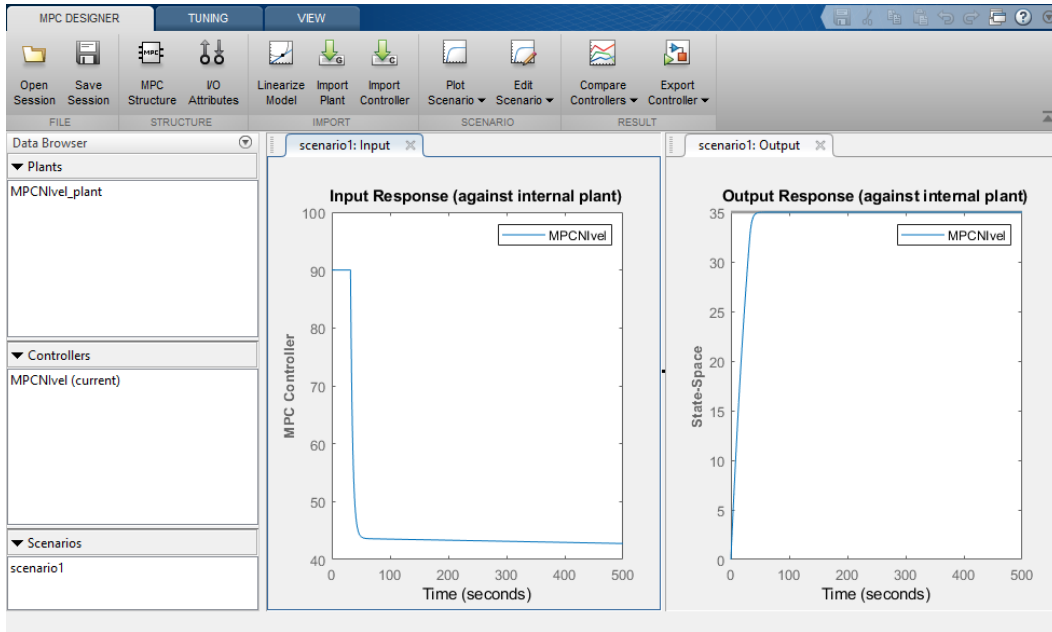


Figura 61. MPC Toolbox

Anexo 8: Ambiente de trabajo NFTool

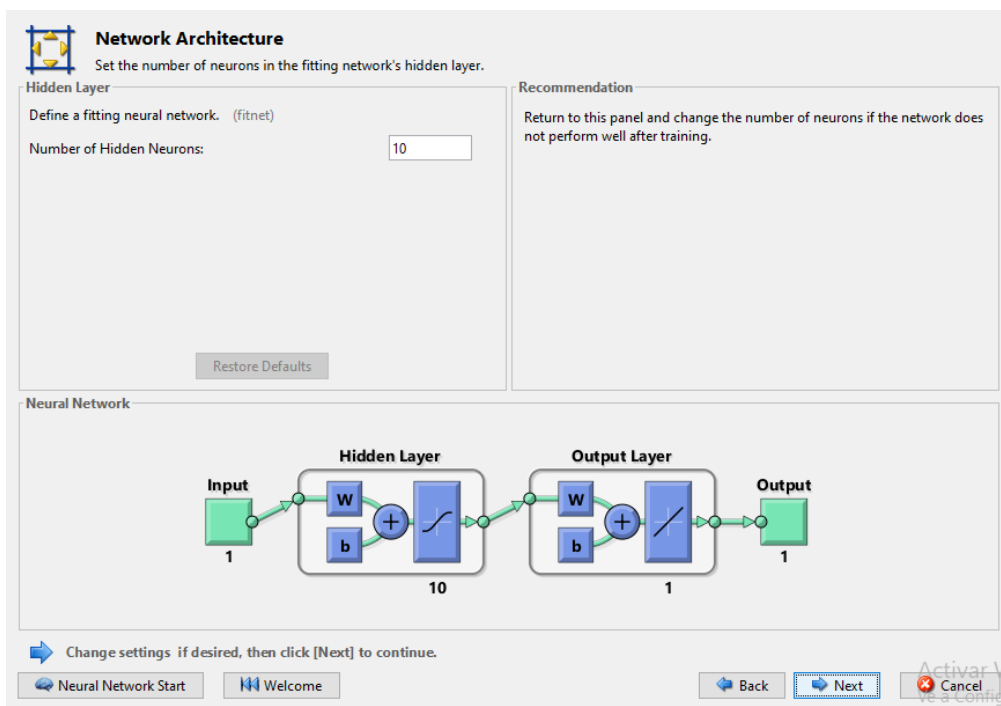


Figura 62. NFTool

Anexo 9: Entrenamiento de red neuronal

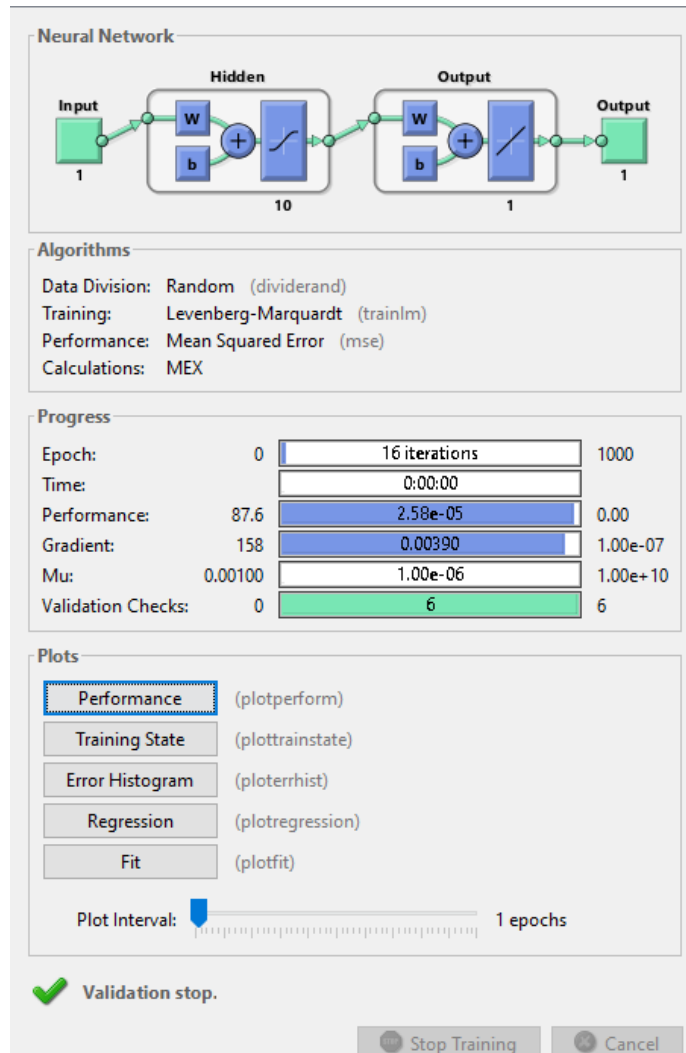


Figura 63. Entrenamiento de red neuronal