

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES
PROGRAMADOS EN PLCs ENFOCADOS AL CONTROL DE
PROCESOS EN ENTORNOS VIRTUALES**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO
VIRTUAL PARA CONTROL DIFUSO DE NIVEL DE UN TANQUE
MEDIANTE EL PLC MODICON M580**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

JOSÉ ANDRÉS JUMBO CORDERO

jose.jumbo@epn.edu.ec

DIRECTOR: LUIS ALBERTO MORALES ESCOBAR

luis.moralesec@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2024

CERTIFICACIONES

Yo, JOSÉ ANDRÉS JUMBO CORDERO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JOSÉ ANDRÉS JUMBO CORDERO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOSÉ ANDRÉS JUMBO CORDERO, bajo mi supervisión.

Ph.D. LUIS MORALES
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOSÉ ANDRÉS JUMBO CORDERO

LUIS ALBERTO MORALES ESCOBAR

DEDICATORIA

A mis padres, María Rosa y José Benildo, cuyo esfuerzo y apoyo me han permitido superar todas las dificultades y alcanzar todos mis objetivos. Su enseñanza y dedicación a lo largo de los años me han formado en quien soy, una persona decidida y dedicada, sin temor a los retos y con un enorme gratitud hacia quienes me apoyan.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Rosa y Benildo, cuya guía me ha servido para seguir un camino recto, llegar a donde estoy y ser el hombre de bien que soy. Su amor y perseverancia me han permitido nunca rendirme, y sé que este es solo el comienzo de algo mejor. Estoy preparado y a la espera de los nuevos retos, confiando en que con su ejemplo y apoyo podré superarlos. Mi deseo es que se sientan orgullosos de mí, así como yo lo estoy de ellos.

A mis hermanos Ángel y Ximena ,y a mis abuelos Isabel y Segundo, que me han apoyado mucho. Incluso en los pequeños gestos que han tenido, los recuerdo y me han impulsado a lo largo de mis estudios. Su apoyo, por mínimo que haya sido, me ha servido de mucho para seguir adelante.

A mi ahijada Mikaela, cuyo cariño y dibujos me han motivado a ser mejor cada día. Sus muestras de afecto y creatividad han sido mi inspiración, dándome fuerzas para levantarme cada mañana con más ganas de continuar y culminar mis estudios.

A mi tutor, PhD. Luis Morales, cuya guía ha sido fundamental a lo largo de este logro. Su orientación y docencia no solo me proporcionaron una dirección clara, sino que también me ayudaron a enfocar mis esfuerzos y alcanzar mis metas académicas.

A mis amigos, quienes no solo han sido un pilar en mis momentos académicos y recreativos, sino que también han brindado apoyo emocional tanto en los mejores momentos como en los desafíos a lo largo de mi carrera universitaria. Valoro profundamente su amistad y espero mantenerla siempre.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	4
1.4.1 SOFTWARE	4
1.4.1.1 Control Expert Classic.....	4
1.4.1.2 Factory I/O	4
1.4.2 HARDWARE.....	8
1.4.2.1 PLC Modicon M580.....	8
1.4.2.2 Elementos de maniobra físicos	9
1.4.3 ALGORITMO DE CONTROL	10
1.4.3.1 Controlador Difuso.....	10
1.4.3.1.1 Fuzzificación	11
1.4.3.1.2 Base de reglas	11
1.4.3.1.3 Mecanismo de inferencia.....	12
1.4.3.1.4 Defuzzificación.....	12
1.4.3.2 Control PID difuso	13
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 Conexión entre Factory I/O y Control Expert Classic/PLC.....	14
2.2 Diseño de Tanque de nivel.....	16
2.3 Diseño del subproceso de llenado, tapado y etiquetado.....	18
2.3.1 Etapa de llenado de botellas	19
2.3.2 Etapa de tapado y etiquetado de botellas.....	20
2.4 Diseño de controlador difuso.....	21
2.4.1 Definición de funciones de membresía.....	21
2.4.2 Funciones de membresía triangulares.....	22
2.4.3 Funciones de membresía gaussianas	23

2.4.4	Diseño de base de reglas.....	24
2.4.5	Mecanismo de inferencia	25
2.4.6	Diseño de controlador PID difuso	26
2.4.7	Ganancias Adaptativas	27
2.4.8	Controlador PID difuso con ganancias adaptativas.....	28
2.5	Diseño de Interfaz Gráfica.....	28
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
3.1	RESULTADOS	30
3.1.1	Comportamiento del Controlador	30
3.1.1.1	Cambio de nivel de referencia sin perturbación	31
3.1.1.2	Cambio de nivel de referencia con perturbación	33
3.1.1.3	Rechazo a perturbaciones	34
3.1.2	Pruebas del Módulo didáctico virtual	35
3.1.2.1	Pruebas de Funcionalidad Básica.....	35
3.1.2.2	Pruebas de secuencia de operaciones y de integración	36
3.1.2.3	Pruebas de temporización.....	41
3.1.2.4	Pruebas de seguridad y fallos.....	42
3.1.3	Implementación con elementos físicos	43
3.2	CONCLUSIONES.....	44
3.3	Recomendaciones.....	45
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
5	ANEXOS.....	50
	ANEXO I. Manual del programa.....	50
	ANEXO II. Hoja Guía para el Laboratorio	55
	ANEXO III. Datasheet Torre de Visualización 24VDC	61
	ANEXO IV. Programación de Funciones de membresía	63
	ANEXO V. Programación de controladores.....	64
	ANEXO VI. Video demostrativo	65

RESUMEN

El software Factory I/O ofrece un entorno industrial virtual con equipos programables mediante un controlador lógico programable (PLC). En el presente trabajo se presenta el desarrollo de módulo didáctico virtual con el objetivo de controlar el nivel de un tanque, al que se agrega una aplicación que incluye las etapas de llenado, tapado y etiquetado de botellas. Durante estas etapas, se integran elementos esenciales del control, como el control de marcha, el paro general, el paro de emergencia y la gestión de posibles fallos.

Para el control de nivel, se diseña un controlador difuso considerando dos tipos de funciones de pertenencia y una inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno, creando así un controlador PID difuso. Además, se implementan ganancias no lineales para mejorar la respuesta del controlador ante perturbaciones lo cual es validado al comparar el funcionamiento del controlador difuso y sus variaciones con un PID convencional. Para ello, se desarrollan los algoritmos de control tanto para el PID convencional como para el PID difuso en el PLC Modicon M580 el cual actúa en una estructura "hardware in the loop", utilizando el software Control Expert Classic.

Por último, se programa una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para visualizar el comportamiento de los controladores y el estado actual del proceso. Esta interfaz gráfica incluye un mando remoto que permite controlar el proceso desde el HMI. Localmente, el proceso se controla desde un tablero virtual realizado en Factory I/O y un tablero físico, donde se conectan al PLC elementos electromecánicos de control y supervisión presentes en el laboratorio de Control Industrial.

Para la validación de los resultados, se realiza un análisis comparativo del desempeño de los controladores, evaluándolos cualitativamente a través de gráficas y cuantitativamente mediante índices de desempeño.

PALABRAS CLAVE: control difuso, PID convencional, Takagi-Sugeno, Factory IO.

ABSTRACT

Factory I/O software offers a virtual industrial environment with programmable equipment through a programmable logic controller (PLC). This paper presents the development of a virtual training module with the objective of controlling the level of a tank, to which is added an application that includes the stages of filling, capping and labeling of bottles. During these stages, essential elements of the control are integrated, such as running control, general shutdown, emergency shutdown and management of possible failures.

For level control, a fuzzy controller is designed considering two types of membership functions and a Takagi-Sugeno type fuzzy inference, thus creating a fuzzy PID controller. In addition, nonlinear gains are implemented to improve the response of the controller to disturbances, which is validated by comparing the performance of the fuzzy controller and its variations with a conventional PID. For this purpose, the control algorithms for both the conventional PID and the fuzzy PID are developed in the Modicon M580 PLC, which acts in a "hardware in the loop" structure, using the Control Expert Classic software.

Finally, a Human Machine Interface (HMI) is programmed to visualize the behavior of the controllers and the current status of the process. This graphical interface includes a remote control that allows the process to be controlled from the HMI. Locally, the process is controlled from a virtual board made in Factory I/O and a physical board, where electromechanical control and supervision elements present in the Industrial Control laboratory are connected to the PLC.

For the validation of the results, a comparative analysis of the performance of the controllers is carried out, evaluating them qualitatively through graphs and quantitatively through performance indexes.

KEYWORDS: fuzzy control, conventional PID, Takagi-Sugeno, Factory IO.

1 INTRODUCCIÓN

En el pasado, los operadores de las plantas de producción realizaban el control de procesos de forma manual, basándose en la toma de decisiones de manera heurística apoyándose en su experiencia, sin embargo, en algunas ocasiones podían presentarse errores debido al factor humano [1]. El estudio de este tipo de toma de decisiones aplicado al campo del control automático mediante el conocimiento de la planta busca transformar el control cualitativo en cuantitativo, mejorando significativamente la precisión, desarrollando lo que se conoce como control difuso. Este tipo de control automático no depende del modelo matemático de la planta sino del conocimiento que un experto (diseñador) tiene de la misma y de las variables que se puedan medir [2].

El control más usado a nivel industrial es el PID debido a que su implementación es simple y mediante una sencilla sintonización de sus parámetros, se logra un control adecuado [3]. A lo largo de los años, diferentes investigaciones han logrado combinar la lógica difusa con el controlador PID dando como resultado un controlador PID difuso, el cual presenta mejor robustez ya que combina la precisión del controlador PID con la flexibilidad del controlador difuso [4]. El controlador PID difuso no depende de la dinámica de la planta por lo que su implementación se basa en el conocimiento de un experto el cual entiende el comportamiento de la planta. Debido a esta característica, este controlador ha sido desarrollado y aplicado en distintas áreas como en el control de procesos, la robótica, la agricultura, etc. [5] [6] [7].

En base a lo indicado, el presente trabajo propone la programación e implementación de dos controladores, un control PID convencional y un control PID difuso basado e inferencia Takagi-Sugeno, los cuales serán comparados de manera cualitativa y cuantitativa en la aplicación de control de nivel de un tanque. Para el controlador difuso se consideran dos diferentes tipos de funciones de pertenencia y se usan ganancias no lineales en los parámetros del controlador, con la finalidad de mejorar el comportamiento del sistema en lazo cerrado ante perturbaciones. Los controladores se han programado e implementado en el PLC Modicon 580 mediante un esquema "hardware in the loop" y su funcionamiento es validado en un módulo didáctico virtual que emula un proceso real industrial para control de nivel programado en el software Factory I/O [8].

Adicionalmente, el proceso consta de una etapa que simula el llenado, tapado y etiquetado de botellas, y se dispone de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) que permite la operación, y la visualización del estado de los instrumentos además de la salida del sistema la cual ha sido desarrollada en el software Control Expert Classic. La respuesta de los controladores

implementados es analizada mediante las gráficas de la salida del sistema y la señal de control, así como mediante índices de desempeño [9].

El Capítulo 1 tiene un carácter teórico, en el cual se explica tanto el software como el hardware que se utiliza, además de incluir una revisión bibliográfica sobre la teoría del control difuso. El Capítulo 2 aborda la conexión entre el software Factory I/O y Control Expert Classic además de la fase de diseño del controlador PID difuso donde se agrega el uso de ganancias adaptativas. Finalmente, en el Capítulo 3 se presenta la fase de resultados en la que se compara un controlador PID convencional con un controlador PID difuso. El controlador difuso incluye pruebas con dos diferentes funciones de membresía donde se puede utilizar o no ganancias no lineales, además se realizan pruebas para validar el funcionamiento de la planta completa incluyendo el control de nivel y el subproceso.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un módulo didáctico virtual para control difuso de nivel de un tanque mediante el PLC Modicon M580.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica de los fundamentos del control PID difuso tipo Takagi-Sugeno.
2. Realizar una revisión detallada de los recursos proporcionados por el software de simulación Factory IO, con el propósito de identificar los elementos adecuados para la implementación de un sistema de control de nivel en un tanque, seguido por un proceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas en un entorno virtual.
3. Desarrollar y programar un módulo didáctico virtual orientado al control de nivel de un tanque incorporando un proceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas dentro de un entorno virtual en Factory I/O.
4. Diseñar e implementar los algoritmos de control en el PLC Modicon M580 el cual controlará el proceso en un esquema hardware in the loop además de programar una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para visualizar el comportamiento de los controladores y el estado actual del proceso.
5. Realizar las pruebas de funcionamiento del módulo para validar su operación, así como realizar un análisis comparativo relacionado con el desempeño de los controladores implementados.

1.3 ALCANCE

- Se realizará una revisión bibliográfica acerca de controladores tales como el control difuso mediante inferencia Takagi-Sugeno y el PID convencional para adquirir un conocimiento completo de sus principios de diseño.
- El módulo didáctico será implementado en el software Factory I/O que proporciona un entorno virtual de simulación por lo que se estudiarán los componentes disponibles, tanto sensores como actuadores con los que se realizará el control de nivel de un tanque además de un proceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas.
- Los controladores de nivel PID convencional y PID difuso serán programados en el software Control Expert Classic. El controlador PID difuso constará de dos diferentes tipos de funciones de pertenencia y el método de inferencia de Takagi-Sugeno, para después realizar la puesta en marcha del sistema e evaluar el funcionamiento del algoritmo que será implementado en el PLC Modicon M580.
- En el PLC Modicon M580 aparte los algoritmos de control de nivel se programará el control de un subproceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas. Además se desarrollará un Interfaz Hombre-Máquina que permita la operación y la visualización del estado de los instrumentos y salida del sistema.
- Se implementará el uso de ganancias no lineales en el algoritmo del controlador difuso para mejorar su respuesta a tareas de seguimiento de referencias y rechazo a perturbaciones.
- Se sintonizarán los controladores de forma heurística mediante experimentación, asegurando una respuesta adecuada del sistema.
- Se llevarán a cabo pruebas para verificar el funcionamiento del sistema virtual, además de realizar un análisis comparativo de la respuesta de los dos algoritmos de control programados.
- Se realizará un análisis cuantitativo mediante los índices de desempeño IAE, ISE e ISCO para evaluar el controlador más adecuado para esta aplicación.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 SOFTWARE

La programación de los controladores se desarrolla en el software Control Expert Classic, para luego ser transferida al PLC Modicon M580. Por otro lado, su validación se lleva a cabo en el módulo didáctico virtual que emula un proceso industrial real el cual es desarrollado en el software Factory I/O.

1.4.1.1 Control Expert Classic

En este software se realiza la programación del PLC Modicon M580. Admite la programación mediante 5 tipos de lenguajes diferentes, estos son: ladder, FBD, SFC, IL y ST. Es una herramienta que facilita la programación mediante bibliotecas de funciones y la creación de bloques personalizados. Además, permite desarrollar interfaces de usuario (HMI) mediante librerías de figuras disponibles en el mismo software. También incluye un simulador para realizar pruebas de funcionamiento de los programas, proporcionando diagnósticos detallados y detección de errores. En caso de utilizar la simulación del PLC en lugar del PLC físico se debe considerar que la dirección IP es 127.0. 0.1. [10]

1.4.1.2 Factory I/O

Factory I/O es un software de simulación en el que se diseña el módulo didáctico virtual con elementos en 3D tales como actuadores, sensores, estaciones, luces piloto entre otros instrumentos típicos en una industria [11]. Sin embargo, el uso de estos elementos está limitado a los que se encuentran en su biblioteca.

Con ayuda de este software es posible simular procesos industriales que pueden conectarse con un PLC, ya sea físico o virtual, proporcionando una experiencia completa que permite observar el comportamiento de un entorno industrial de manera muy aproximada a la realidad [12]. La planta desarrollada en este software (módulo didáctico) para el control de nivel de un tanque, así como el proceso que emula el llenado, etiquetado y tapado de botellas, contiene los siguientes elementos:

Tanque: es el recipiente en el que se controla el nivel y se puede observar en la Figura 1.1. Tiene una altura máxima de 300 cm, un diámetro de 200 cm, flujo de entrada máximo de 0.25 m³/s y flujo de salida máximo de 0.3543 m³/s [13]. En el contexto de este proyecto, esta estación es configurada como analógica, e incluye un sensor de nivel capacitivo, y dos servoválvulas de control: una para el ingreso y otra para la salida del líquido.



Figura 1.1. Tanque de nivel en Factory I/O

Posicionador de dos ejes: Este equipo se usa para posicionar objetos mediante el movimiento en dos ejes (Figura 1.2); se puede mover en el eje “x” y en el eje “z”. En este trabajo se usa como dispensador de líquido. Cuando las botellas son detectadas por el sensor que se encuentra cerca de este equipo, el brazo baja usando solo el actuador del eje z.



Figura 1.2. Posicionador de dos ejes en Factory I/O

Cilindros neumáticos: El cilindro neumático se muestra en la Figura 1.3, y se halla en la categoría de “piezas de carga ligera”. Dispone de dos sensores: uno para cuando el vástago está completamente extendido y el otro para cuando está contraído. La carrera del vástago tiene una distancia máxima de 90cm y tiene un control analógico o digital siendo usado el control digital.



Figura 1.3. Cilindro neumático en Factory I/O

Posicionador: En la Figura 1.4. se muestra el posicionador. Este dispositivo se usa para sostener los elementos en la misma posición con el objetivo de evitar su movimiento. Su configuración es tipo digital con una carrera vertical de 37.3cm y una carrera de sujeción de 0.48cm. En el proyecto, se usa para sujetar las botellas en la etapa de sellado y etiquetado.

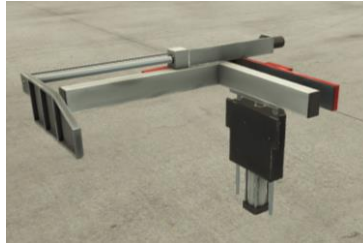


Figura 1.4. Posicionador en Factory I/O

Bandas transportadoras: Existen diferentes tipos de tamaños de bandas entre las cuales se encuentran 2,4 y 6 metros. Al controlarla de manera digital (ON/OFF) su velocidad máxima de 0.6m/s. En el contexto del proyecto se usan 5 bandas transportados dispuestas como se observa en la Figura 1.5. Cuatro de estas son accionadas como un solo cuerpo, mientras que la última es usada para el proceso de expulsión de botellas.



Figura 1.5. Bandas trasportadoras en Factory I/O

Sensor fotoeléctrico difuso: Es un sensor de presencia de objetos sólidos (Figura 1.6), el cual puede detectar hasta una distancia máxima de 1.6m. En este proyecto estos sensores se ubican en las bandas transportadoras para detectar las cajas que emulan a botellas. Se dispone uno para la parte del llenado, otro para el sellado etiquetado, otro para conteo de botellas en la banda trasportadora, otro para activar expulsión de botellas y el último para contar el número de botellas expulsadas.



Figura 1.6. Sensor difuso en Factory I/O

Tablero de control: En estos tableros se pueden ubicar distintos elementos de control como pulsadores y elementos de visualización como luces piloto o un display digital. En la Figura 1.7 se observan los tableros de control del proceso, estos tableros están constituidos por 5 pulsadores NA y dos NC, utilizados para marcha, paro, marcha del subproceso, reset, y para aumentar y disminuir el número de botellas deseadas. Además se tiene pulsantes tipo hongo para el paro de emergencia, un selector de dos posiciones para elegir entre el modo local/remoto y 4 indicadores digitales en total, que muestran el nivel del tanque, el número de botellas llenadas, el número de botellas deseadas y número de botellas terminadas.



Figura 1.7. Tableros con elementos de control en Factory I/O

Luz de emergencia: El elemento que se observa en la Figura 1.8 es una luz rotativa de color amarillo que se usa como señal de advertencia. En este proyecto, esta se activa al presionar el pulsante de emergencia, no se desactiva hasta que se desenchave el pulsador y se presione el botón de reinicio.



Figura 1.8. Luz de emergencia en Factory I/O

La torre de señalización: Está compuesta por tres luces indicadoras de color verde, amarillo y rojo, se la puede observar en la Figura 1.9.



Figura 1.9. Torre de señalización en Factory I/O

Sirena: Esta es una señal sonora ya que en su activación produce un sonido de alarma y se la observa en la Figura 1.10.



Figura 1.10. Sirena en Factory I/O


1.4.2 HARDWARE

1.4.2.1 PLC Modicon M580

Es un controlador de gama alta de la marca Schneider. Específicamente es un controlador de automatización programable Ethernet (ePAC) , ya que integra toda la comunicación y arquitectura de automatización con tecnología ethernet, por lo que en cualquier parte del mundo a cualquier hora la información de la producción es accesible. Permite realizar configuraciones, modificaciones o aplicaciones sin que se interrumpa el proceso, además de que su bus dual de E/S ayuda en la redundancia aun en procesos más complejos [14].

Los módulos que forman el Modicon M580 son los siguientes: BMX CPS 3500 que es la fuente de alimentación la cual tiene una entrada de 110 VAC. BME P58 1020 es el procesador que tiene una memoria RAM de 4MB, BMX DAI 1604 es el módulo de 16 entradas digitales cada una soporta una frecuencia de 60Hz con un voltaje de 120V, el módulo de salidas digitales se llama BMX DRA 1605 que tiene 16 salidas tipo relé que son digitales, por último, se tiene el BMX AMM 0600 que es un módulo de entradas y salidas analógicas, teniendo dos salidas de voltaje y corriente, y cuatro entradas del mismo tipo [15]. Las características principales del ePAC Modicon M580 se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características del ePAC Modicon M580

 <p>Figura 1.11. Modicon M580</p>	Característica	Valor
	Entradas digitales	16
	Salidas digitales	16
	Entradas analógicas	4
	Salidas analógicas	2
	Alimentación	100-240 VAC
	Puertos disponibles	Ethernet y USB
	Consumo típico	270 mA

1.4.2.2 Elementos de maniobra físicos

En el módulo didáctico virtual se encuentran disponibles dos tableros de control también virtuales. Además, en este trabajo se ha implementado la conexión de elementos físicos al PLC para interactuar de manera más realista con el entorno virtual. Esto facilita el control de la planta tanto a través de los tableros virtuales como mediante los elementos físicos del tablero. Los elementos utilizados se describen a continuación:

Pulsadores: Se usan 6 pulsadores como los de la Figura 1.12. cada uno de estos se conecta a la fase de 120VAC del mismo PLC para ser utilizados como entradas. Se emplea uno para la marcha del proceso, el único normalmente cerrado para el paro del sistema, uno para la marcha del subproceso, uno para el aumento y otro para la disminución de número de botellas deseadas y el último sirve para resetear toda la planta.



Figura 1.12. Pulsadores Industriales.[16]

Luces piloto: Son luces indicadoras como las que se pueden observar en la Figura 1.13. Estas luces deben ser alimentadas a 220VAC y en total se usan 6. Cada una se encienden para indicar las siguientes condiciones: activación de la sección de llenado, etiquetado, sellado, reseteo del sistema, emergencia activa y por último la presencia de un fallo.



Figura 1.13. Luces piloto[17]

Contactora trifásica: El dispositivo electromecánico se puede observar en la Figura 1.14. Su bobina se activa con una alimentación de 220VAC a través de una salida del PLC. Sus contactos se conectan a una red trifásica ya que función principal es operar el motor de inducción.



Figura 1.14. Contactora trifásica [18]

Torre de señalización: Es una torre que contiene 3 luces y un zumbador como se puede observar en la Figura 1.15. Este dispositivo funciona con voltaje de 24VDC.



Figura 1.15. Torre de señalización [19]

El motor de inducción trifásico: Este equipo opera con una tensión nominal de 220V y una corriente de 2.3A, alcanzando una velocidad de 1670 RMP a una frecuencia de 60Hz. Como se puede observar en la Figura 1.16 la conexión del motor utilizada es tipo estrella.



Figura 1.16. Motor de inducción trifásico [20]

1.4.3 ALGORITMO DE CONTROL

1.4.3.1 Controlador Difuso

El control difuso proviene de la lógica difusa, desarrollada por Lofti Zadeh [21], al estudiar la toma de decisiones de tipo lingüístico a través del razonamiento. Mediante un enfoque matemático, se trata de emular la toma de decisiones con respecto a la experiencia y al razonamiento humano por lo que, gracias a la teoría de conjuntos difusos es posible representar variables lingüísticas en forma cuantitativa, asociando un grado de pertenencia a dichos conjuntos [22].

Como se observa en la Figura 1.17, el controlador difuso está conformado por la interfaz de fuzzificación, la base de reglas, el mecanismo de inferencia y, por último, la interfaz de defuzzificación. A continuación, se explica cada una de estas partes.

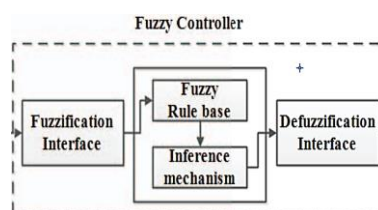


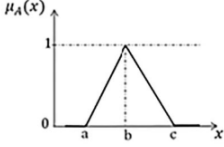
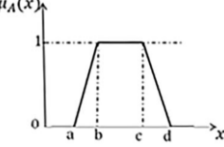
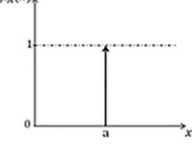
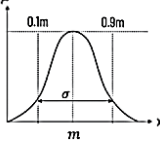
Figura 1.17. Componentes del Controlador difuso.[23]

1.4.3.1.1 Fuzzificación

Los conjuntos clásicos tienen valores booleanos que son 0 o 1, donde un elemento puede pertenecer o no a dicho conjunto, mientras que los conjuntos difusos toman valores entre 0 a 1, representado un grado de pertenencia parcial [21]. La fuzzificación busca calcular el valor del grado de pertenencia de la entrada a cada conjunto difuso, considerando que cada conjunto difuso equivale matemáticamente a una función de pertenencia o también llamada función de membresía.

El número y el tipo de funciones de membresía dependen del criterio del usuario en el diseño del controlador, debido a la simplicidad matemática las funciones de pertenencia que más se usan son las que se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Funciones de membresía con sus ecuaciones

Tipo de función de membresía	Ecuación que la representa
 <p>Figura 1.18. Función Triangular [24]</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0; & \text{si } x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & \text{si } a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right); & \text{si } b \leq x \leq c \\ 0; & \text{si } x > c \end{cases} \quad (1.1)$
 <p>Figura 1.19. Función Trapezoidal [24]</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0; & \text{si } x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1; & \text{si } b \leq x \leq c \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right); & \text{si } c \leq x \leq d \\ 0; & \text{si } x > d \end{cases} \quad (1.2)$
 <p>Figura 1.20. Función Singleton [24]</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1; & \text{si } x = a \\ 0; & \text{si } x \neq a \end{cases} \quad (1.3)$
 <p>Figura 1.21. Función Gaussiana [25]</p>	$\mu_A(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (1.4)$

1.4.3.1.2 Base de reglas

Son el conjunto de reglas lingüísticas necesarias para controlar el sistema, dadas por un experto gracias a su experiencia con la planta. Estas reglas son sentencias condicionales que se basan en proposiciones de tipo “Si” A - “entonces” B. Siendo A la premisa y B el consecuente; esto para cuando se tiene un sistema SISO (Single Input, Single Output),

pero al trabajar con un sistema MISO (Multiple Input, Single Output), en el cual se tiene múltiples entradas y una salida, la sentencia condicional viene dada como en la Ecuación 1.5. [26]

$$\text{Si } \tilde{u}_1 \text{ es } \tilde{A}_1^j \text{ y } \tilde{u}_2 \text{ es } \tilde{A}_2^k \text{ y } \dots \dots \text{ y } \tilde{u}_n \text{ es } \tilde{A}_n^l \text{ Entonces } \tilde{y}_q \text{ es } B_q^p \quad (1.5)$$

Donde \tilde{A}_1^j , \tilde{A}_2^k y \tilde{A}_n^l son los conjuntos difusos y B_q^p es el consecuente.

1.4.3.1.3 Mecanismo de inferencia

El mecanismo de inferencia para el presente proyecto es tipo Takagi-Sugeno, en sistemas tipo MISO que tienen múltiples entradas y una sola salida sus reglas difusas son como en la Ecuación 1.6.

$$\text{Si } \tilde{u}_1 \text{ es } \tilde{A}_1^j \text{ y } \tilde{u}_2 \text{ es } \tilde{A}_2^k \text{ y } \dots \dots \text{ y } \tilde{u}_n \text{ es } \tilde{A}_n^l \text{ Entonces } b_i = g_i(.) \quad (1.6)$$

Donde \tilde{u}_1 , \tilde{u}_2 y \tilde{u}_n son las entradas del sistema y, \tilde{A}_1^j , \tilde{A}_2^k y \tilde{A}_n^l son los conjuntos difusos, mientras que el consecuente $g_i(.)$ es una función polinómica de orden cero o función tipo singleton como el de la Figura 1.20, por lo que en este tipo de sistema el consecuente $g_i(.)$ no funciona como un término lingüístico, como consecuencia el sistema funcional se generaliza por lo que para representar la premisa se usa el mínimo o el producto.[26]

1.4.3.1.4 Defuzzificación

Este es el proceso inverso a la fuzzificación donde se obtiene un valor numérico real a partir de las funciones de pertenencia con su respectivo grado de pertenencia. El método más usado es el del centro de gravedad.

Como se puede observar en la Figura 1.22, el sistema difuso tipo Takagi-Sugeno no tiene el proceso de defuzzificación debido a que la regla difusa activa da como consecuente un valor numérico real.

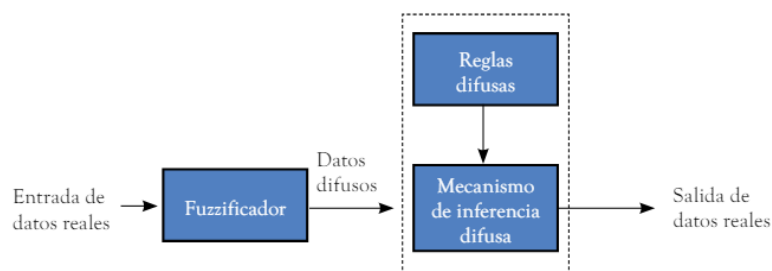


Figura 1.22. Sistema difuso Takagi-Sugeno [27].

Por lo que para obtener un valor de salida para el controlador se usa el método de la media ponderada que se muestra en la Ecuación 1.7. [28]

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i} \quad (1.7)$$

Donde b_i es el consecuente de cada regla, μ_i es el grado de pertenencia y R es el número de reglas.

1.4.3.2 Control PID difuso

El controlador PID difuso es la combinación entre un controlador PI y un controlador PD de características difusas como se muestra en la Figura 1.23. En el esquema, las entradas error y derivada del error son multiplicadas por k_p y k_d respectivamente, mientras que la salida del controlador difuso se multiplica con una ganancia β y se suma con la integración de la salida multiplicada por una ganancia α . [29]

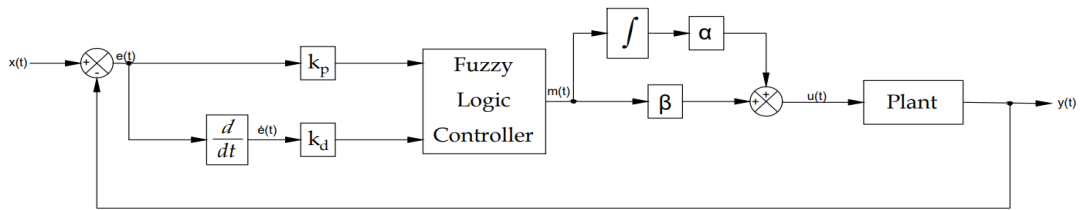


Figura 1.23. Controlador PID difuso

En la Ecuación 1.8 se presenta la expresión matemática de la salida del controlador PID difuso. [30]

$$u_{PID-Fuzzy} = \alpha \int m(t)dt + \beta m(t) \alpha \int [(e(t)k_p + \dot{e}(t)k_d)]dt + \beta [e(t)k_p + \dot{e}(t)k_d] \quad (1.8)$$

Resolviendo (1.8):

$$u_{PID-Fuzzy} = e(t)[\beta k_p + \alpha k_d] + \alpha k_p \int e(t)dt + \beta k_d \dot{e}(t) \quad (1.9)$$

En la Ecuación 1.10 se observa que la equivalencia del controlador PID difuso a un controlador PID convencional se da mediante las expresiones (1.10-1.12) [31]:

- La parte proporcional se representa por la Ecuación 1.10.

$$\beta k_p + \alpha k_d \quad (1.10)$$

- La parte integral se representa por la Ecuación 1.11.

$$\alpha k_p \quad (1.11)$$

- La parte derivativa se representa por la Ecuación 1.12.

$$\beta k_d \quad (1.12)$$

2 METODOLOGÍA

Este trabajo de integración curricular adopta un enfoque exploratorio-experimental. En este se implementa un controlador PID difuso para regular el nivel de un tanque de almacenamiento dentro de un proceso simulado en el software Factory I/O. Esta aplicación no solo asegura el control preciso del nivel, sino que también gestiona un subproceso completo de llenado, sellado y etiquetado de botellas. Este enfoque permite observar el desempeño del controlador al mantener el nivel de referencia establecido.

2.1 Conexión entre Factory I/O y Control Expert Classic/PLC

Para establecer una conexión correcta entre Factory I/O y Control Expert, se configura el software Factory I/O seleccionando el driver tipo Modbus TCP/IP Client. Posteriormente, se accede a la ventana de configuración mostrada en la Figura 2.1, donde se observa el apartado de Server, allí se modifica la casilla de Host escribiendo la dirección IP cargada en el PLC [32]. Mientras que el puerto y el ID del esclavo se mantienen por defecto. En el apartado de I/O Config, se configura Read Digital como Input y Read Register como Input Registers. La sección de Scale está definida en 100, por lo que las variables analógicas ya sean de entrada o salida tienen que ser configuradas en el PLC desde 0 hasta un valor máximo de 1000. En la sección de I/O Points se encuentra la configuración tanto para el número de entradas como salidas analógicas y digitales. El offset determina el inicio del conteo mientras que Count determina el número total. Para el presente trabajo las Digital Inputs se configuran de 0 a 25 (26 entradas), mientras que las Digital Outputs van de 26 a 50 (26 salidas). Las Register Inputs, que son entradas analógicas, son 8 (desde 0 hasta 7), y las Register Outputs, que son salidas analógicas, son 16 (desde 8 hasta 23).

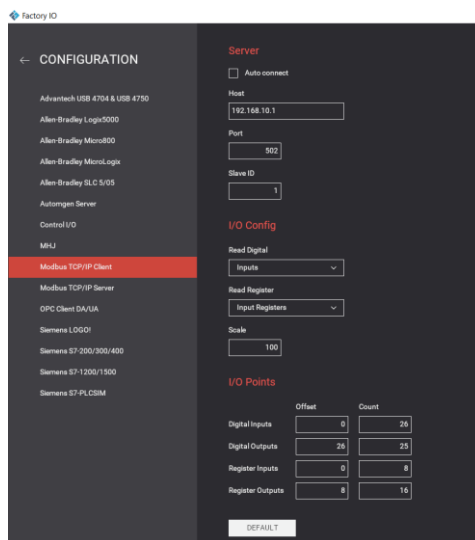


Figura 2.1. Configuración del software Factory I/O

En módulo didáctico virtual que es implementado con los instrumentos descritos en la sección 1.4.1.2, se crean los respectivos tags de los sensores y actuadores como se muestra en la Figura 2.2, que presenta los elementos considerados como entradas y salidas a ser conectadas con el PLC. Al lado izquierdo se ubican los elementos de protección, maniobra y sensores, mientras que a la derecha se mapean las salidas analógicas y digitales.

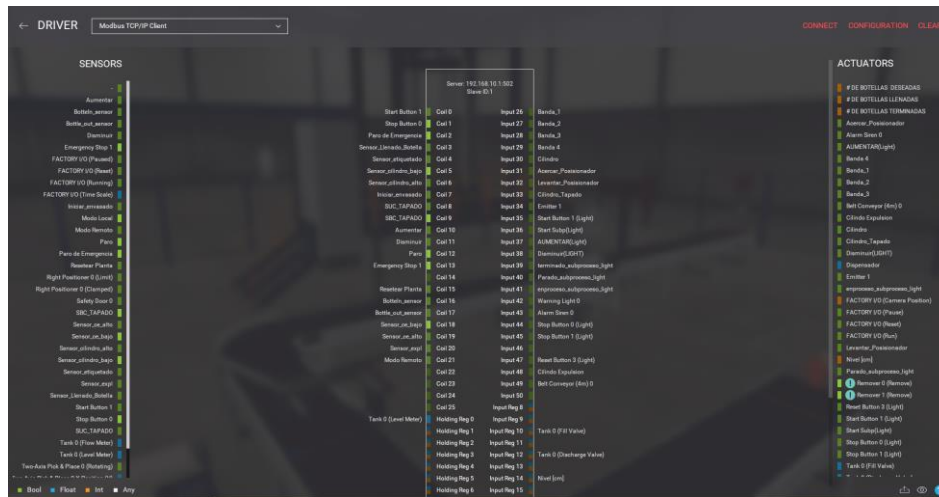


Figura 2.2. Mapeo de Tags en Factory I/O

Para establecer una correcta comunicación entre la programación y el elemento virtual, se deben configurar a los tags creados en Control Expert como marcas. Estos deben tener la misma dirección de los tags mapeados en Factory I/O. En la Figura 2.3 se observa como en el software Control Expert se usa la nomenclatura %MX para marcas de memoria booleana, mientras que %MWX es usado para palabras, donde X es un número entero que representa la dirección de marca.

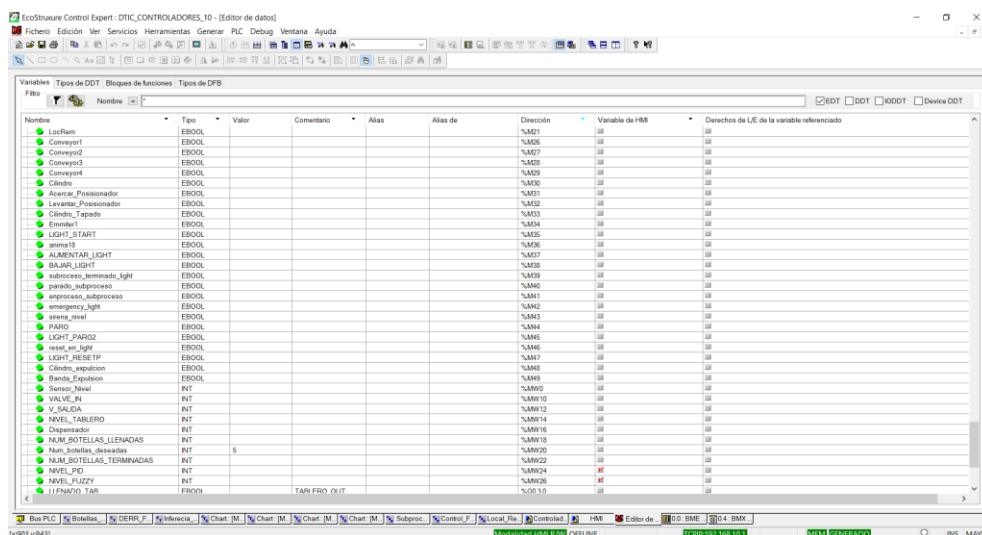


Figura 2.3. Tags usados para conexión con Factory I/O

Para iniciar con la simulación del módulo didáctico virtual, con la lógica de control implementada en el software Control Expert Classic y el programa del PLC en ejecución, se selecciona la opción “Connect” que se observa en la pantalla de la Figura 2.2. Una vez que se establece una conexión exitosa, se procede a hacer clic en el botón “play” que se puede observar en la Figura 2.4.

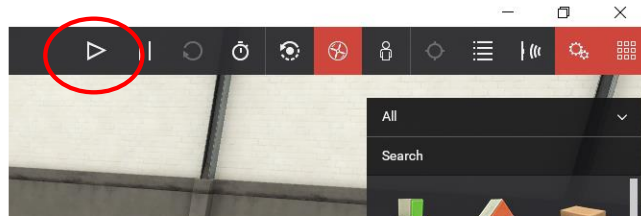


Figura 2.4. Empezar simulación en Factory I/O.

2.2 Diseño de Tanque de nivel

El tanque de control de nivel que se implementa en el software Factory I/O se visualiza en la Figura 2.5. Para una mejor presentación se lo eleva en una plataforma teniendo acceso al tanque mediante escaleras. El sensor de nivel LS es de tipo analógico. Como actuador se dispone de una válvula de entrada analógica que mediante la acción de control modifica su apertura. Por otro lado, válvula de salida opera para facilitar para el llenado de líquido en las botellas.

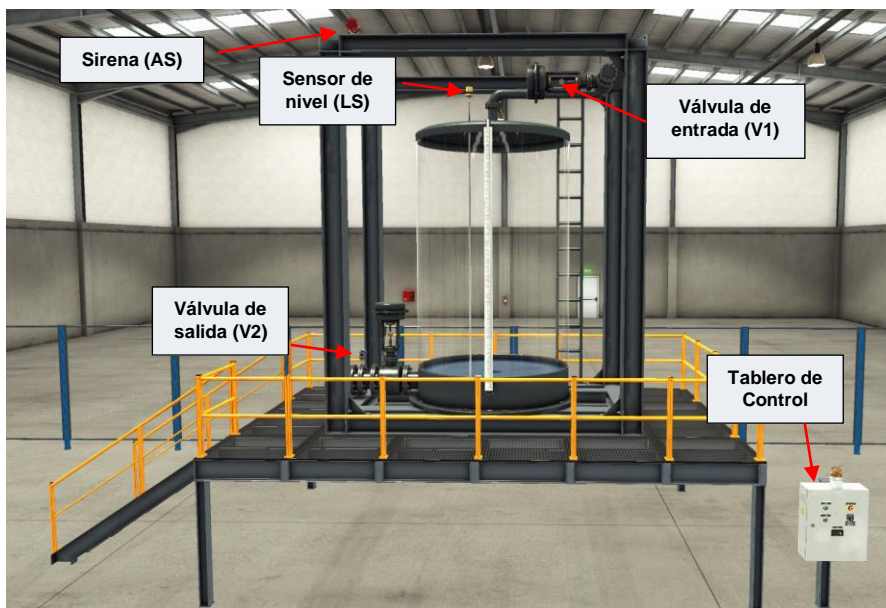


Figura 2.5. Tanque diseñado en Factory I/O

A la derecha del tanque se construye un tablero con elementos de supervisión y control. En la Figura 2.6 se muestran todos los elementos que contiene este tablero de control.

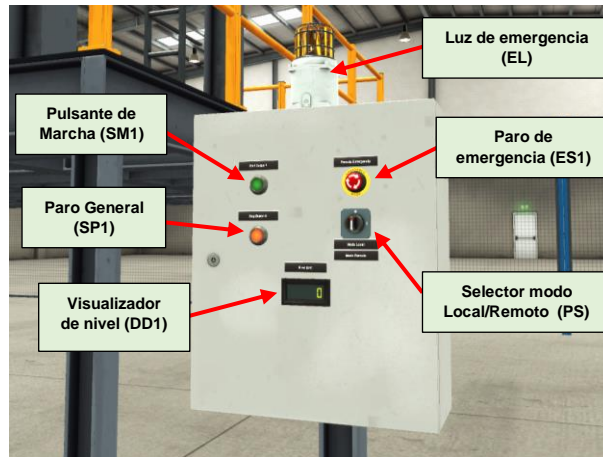


Figura 2.6. Tablero de control realizado en Factory I/O

El diagrama de flujo de la Figura 2.7 presenta la etapa de llenado del tanque.

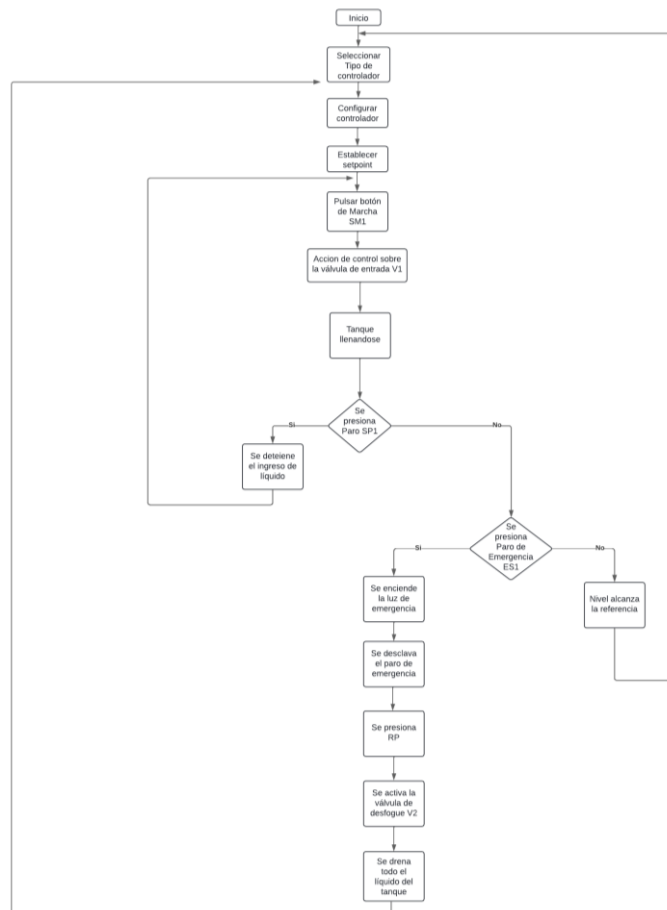


Figura 2.7. Diagrama de flujo de la operación del llenado del tanque.

El proceso inicia en el HMI con la selección del tipo de controlador y su configuración, además, se debe establecer una referencia de nivel. Al momento de presionar el pulsante de marcha SM1 el tanque empieza a llenarse, si se presiona el pulsante de paro SP1 el proceso se detiene, y para volver a reanudar el llenado se debe pulsar nuevamente SM1.

Por otro lado, si se pulsa el botón de emergencia ES1 se detiene el llenado. Para que el proceso vuelva a funcionar, se desenclava ES1 y se pulsa el botón de reset RP, lo que permite la descarga completa del líquido presente en el tanque. Solo si el tanque está completamente vacío después de presionar RP, se puede iniciar el llenado nuevamente.

2.3 Diseño del subproceso de llenado, tapado y etiquetado.

El subproceso consta de 3 partes correspondientes a: llenado, tapado y etiquetado de botellas. En la Figura 2.8 se observa cada uno de los elementos que se encuentran en cada etapa de los subprocesos.

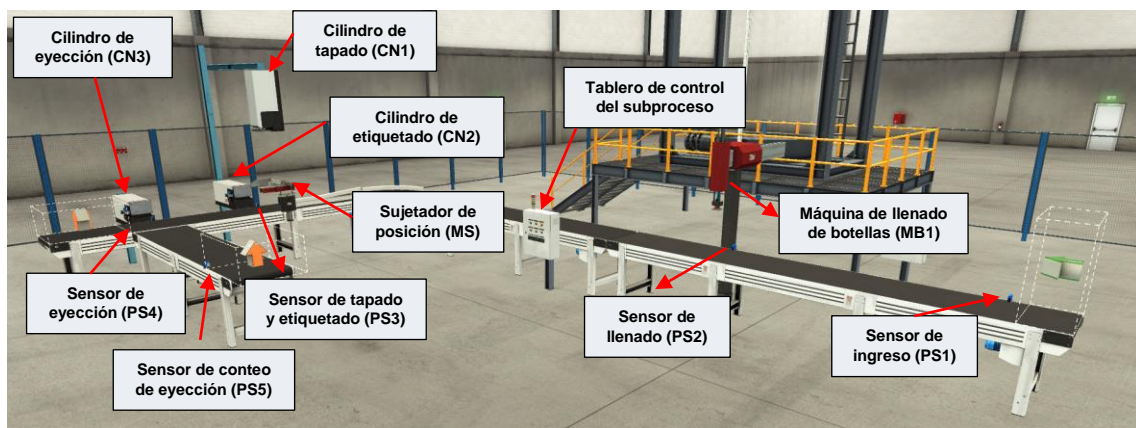


Figura 2.8. Subproceso diseñado en Factory I/O

En la Figura 2.9 se muestran los elementos que componen el tablero diseñado para el control del subproceso. Este tablero se encuentra ubicado frente a las bandas transportadoras para facilitar un control ágil del subproceso.

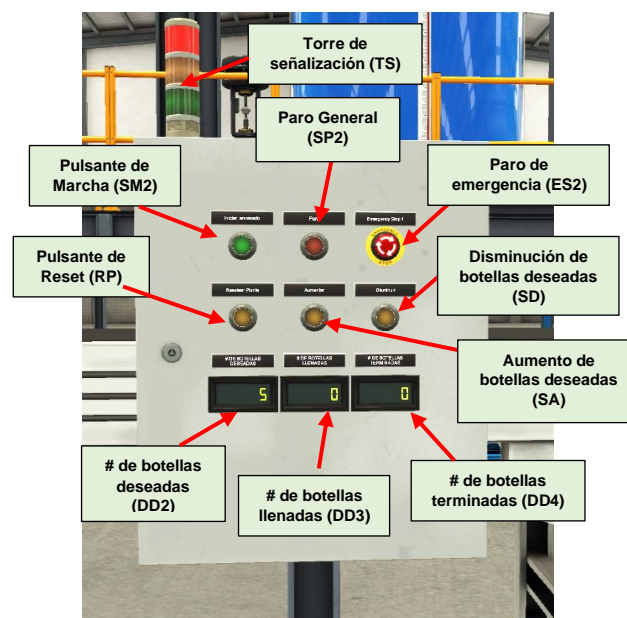


Figura 2.9. Tablero de control para subproceso

El número de botellas deseadas se puede modificar únicamente antes del inicio del subproceso. Para aumentar el número de botellas deseadas se usa el pulsante SA, mientras que para disminuir este número se presiona el pulsante SD.

2.3.1 Etapa de llenado de botellas

Se utilizan cajas en lugar de botellas debido a que estas no están disponibles en el software Factory I/O. El proceso inicia al presionar el pulsante de marcha SM2, activando la banda transportadora siempre y cuando se tenga el nivel deseado en el tanque.

Como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 2.10, la etapa de llenado de una botella comienza al momento que el sensor PS2 detecta la presencia de la botella, lo cual ocasiona el paro de la banda transportadora. Luego, la máquina de llenado MB1 baja su brazo y la válvula de salida V2 se abre por un tiempo previamente definido. Una vez finalizado este tiempo, la válvula V2 se cierra y MB1 retorna a su posición inicial.

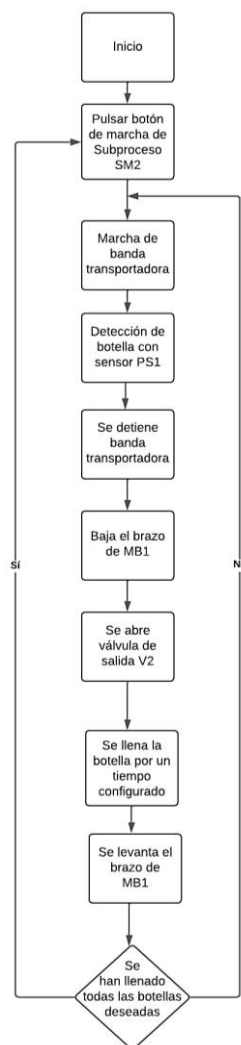


Figura 2.10. Diagrama de flujo de la etapa de llenado de botellas

2.3.2 Etapa de tapado y etiquetado de botellas

Como se observa en la Figura 2.11, la fase de tapado comienza cuando el sensor PS3 detecta la botella, la cual es asegurada con el actuador MS. Luego, el vástago del cilindro neumático CN1 baja y sube simulando el tapado. Al momento que se finaliza el tapado comienza la etapa de etiquetado en donde el cilindro neumático CN2 acciona extendiendo el vástago, hasta tocar la botella y se retrae nuevamente. Cuando la botella acaba la etapa de etiquetado automáticamente el actuador MS vuelve a su posición original.

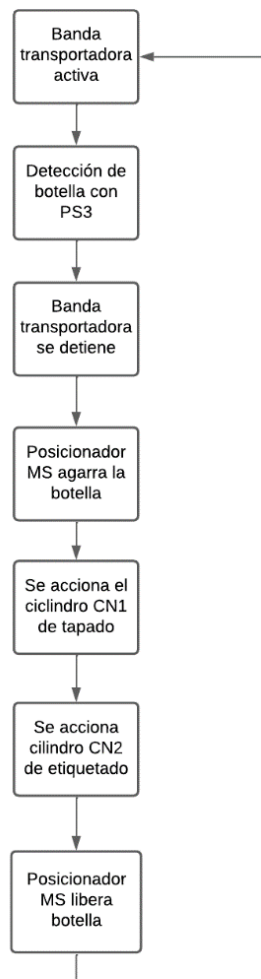


Figura 2.11. Diagrama de flujo de la etapa de sellado y etiquetado

El cilindro neumático CN3 y el sensor de presencia PS4, sirven para expulsar las botellas que se encuentran en la banda transportadora, siempre y cuando se haya pulsado el botón RP. La planta puede volver a funcionar con normalidad, una vez que se haya drenado todo el líquido del tanque y se hayan expulsado todas las botellas presentes en la banda transportadora.

Los pulsantes SP1 y SP2 son de paro general. Si cualquiera de los dos pulsantes se activa, el subproceso se detiene en cualquier parte de sus etapas. Para reanudar el proceso, se debe pulsar el botón SM1 y luego el botón SM2. Cuando se reanuda el proceso, se completa la etapa en la que se detuvo. Por ejemplo, si se activa el paro durante el llenado de una botella, al reanudar el proceso, el llenado continuara solo por el tiempo restante.

2.4 Diseño de controlador difuso

El controlador PID difuso se diseña para el control de nivel de un tanque implementado en el software Factory I/O. En la Figura 1.23 se ha mostrado que el sistema difuso tiene dos entradas, las cuales corresponden al error y a la derivada del error. El error se calcula como:

$$e(t) = x(t) - y(t) \quad (2.1)$$

Donde $x(t)$ es la referencia o setpoint, y $y(t)$ es la salida de la planta, que corresponde al nivel actual medido por el sensor analógico de nivel.

2.4.1 Definición de funciones de membresía

El controlador difuso se diseña con dos diferentes tipos de funciones de membresía con la finalidad de realizar una comparación. Estas son: triangulares y gaussianas, las cuales han sido seleccionadas por su facilidad de implementación mediante programación. Debido a que existen dos entradas, entonces se utilizan funciones de membresía tanto para el error como para la derivada del error, y se considera para cada entrada 5 funciones de membresía. El significado de cada función de membresía se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Funciones de membresía con su respectivo significado

Entrada	Abreviatura	Significado
Error	NG	Negativo grande
	NM	Negativo medio
	Z	Cero
	PM	Positivo medio
	PG	Positivo grande
Derivada de error	deNG	Derivada del error Negativo grande
	deNM	Derivada del error Negativo medio
	deZ	Derivada del error Cero
	dePM	Derivada del error Positivo medio
	dePG	Derivada del error Positivo grande

2.4.2 Funciones de membresía triangulares

En la Figura 2.12 se muestran las cinco funciones de membresía triangulares para cada entrada, las mismas son normalizadas con una entrada en el rango de [-1,1], y con un grado de pertenencia de [0,1]. Cada función triangular es simétrica, con los centros de los triángulos ubicados en -1, -0.5, 0, 0.5 y 1, respectivamente, y la separación de los vértices a 0.5 de ambos lados del centro.

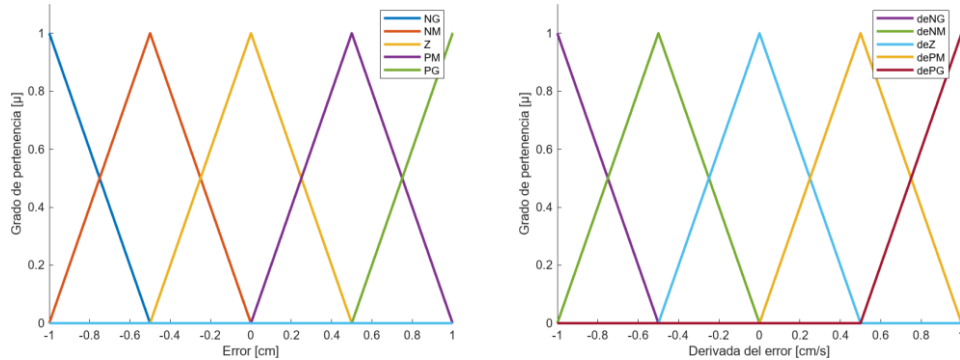


Figura 2.12. Funciones de membresía triangulares

Las funciones de membresía son programadas en lenguaje ST, debido a la facilidad de crear vectores para guardar cada una de las funciones. Como se puede observar en la Figura 2.13 las funciones de membresía son modificables, ya que a cada una se les puede cambiar su centro y vértices respecto a lo que se detallada en los comentarios del código. Por último, se guarda cada función de pertenencia en los vectores mediante la combinación de un bucle FOR con una sentencia CASE.

```

FUZZY_ERR[0]:=0.0;FUZZY_ERR[1]:=0.0;FUZZY_ERR[2]:=0.0;
FUZZY_ERR[3]:=0.0;FUZZY_ERR[4]:=0.0;

(*Primera funcion de membresia*)
a:= -1.0; (*Centro*)
b:= -0.5; (*Vertice derecho*)
(*Segunda funcion de membresia*)
c:= -1.0; (*Vertice izquierdo*)
d:= -0.5; (*Centro*)
e:= 0.0; (*Vertice derecho*)
(*Tercera funcion de membresia*)
f:= -0.5; (*Vertice izquierdo*)
g:= 0.0; (*Centro*)
h:= 0.5; (*Vertice derecho*)
(*Cuarta funcion de membresia*)
o:= 0.0; (*Vertice izquierdo*)
p:= 0.5; (*Centro*)
q:= 1.0; (*Vertice derecho*)
(*Quinta funcion de membresia*)
r:= 0.5; (*Centro*)
s:= 1.0; (*Vertice derecho*)

FOR i := 0 TO 4 DO
CASE i OF
0:
IF err <= a THEN
FUZZY_ERR[i] := 1.0;
ELSIF err > a AND err < b THEN
FUZZY_ERR[i] := (b - err) / (b - a);
END_IF;
1:
IF err >= c AND err < d THEN
FUZZY_ERR[i] := (err - c) / (d - c);
ELSIF err >= d AND err < e THEN
FUZZY_ERR[i] := (e - err) / (e - d);

```

Figura 2.13. Centros y vértices de cada función de membresía triangular

El bloque FBD personalizado (Figura 2.14) con el algoritmo anteriormente explicado se llama "ERROR_FUZZY". La entrada de este bloque es el error, y la salida proporciona un arreglo con 5 vectores, cada uno de estos vectores contiene una función de membresía.

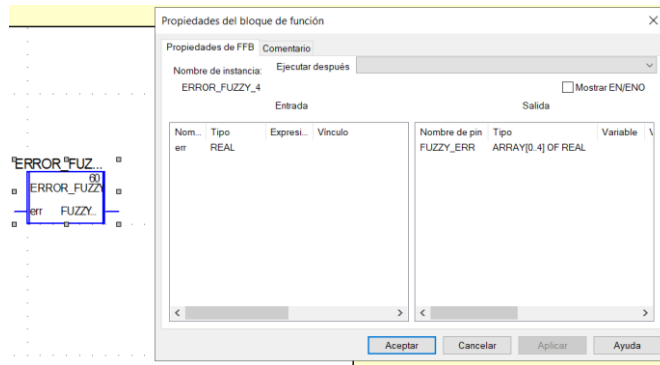


Figura 2.14. Bloque creado para los grados de pertenencia de las funciones triangulares

El mismo código se crea en un bloque diferente para las funciones de membresía triangulares de la derivada del error.

2.4.3 Funciones de membresía gaussianas

En la Figura 2.15 se muestran 5 funciones de membresía tipo gaussianas, tanto para el error como para la derivada del error. Cada una de estas tiene el centro en -1, -0.5, 0, 0.5 y 1, respectivamente con una amplitud de campana de 0.2.

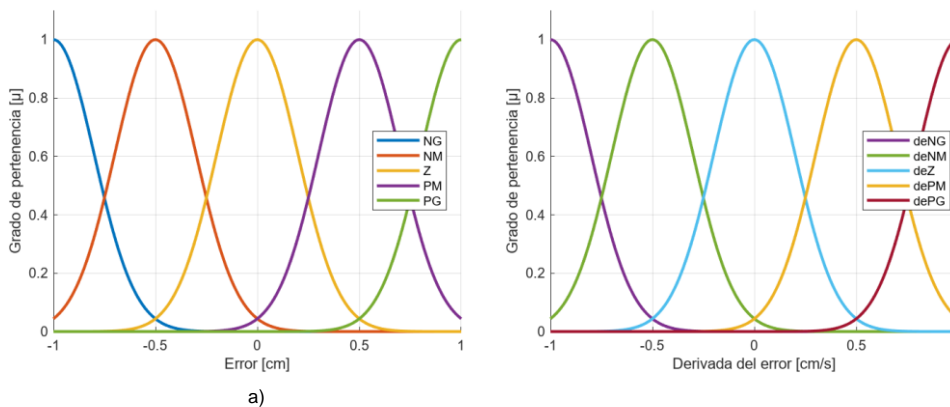


Figura 2.15. Funciones de membresía gaussianas

Para la programación, al igual que con las funciones triangulares, se crea un bloque personalizado. Como se puede observar en la Figura 2.16, en el algoritmo se puede modificar los centros de cada función, así como su ancho de campana, el cual se cambia al modificar el valor de σ . Además, se usa un bucle FOR para guardar en vectores cada una de las funciones de membresía gaussianas.

```

sigm:=0.2;
mu[0]:=-1.0; (*Centro 1*)
mu[1]:=-0.5; (*Centro 2*)
mu[2]:=0.0; (*Centro 3*)
mu[3]:=0.5; (*Centro 4*)
mu[4]:=1.0; (*Centro 5*)

FOR i := 0 TO 4 DO
  FUZZY DERRG[i] := EXP(-(((derrg- mu[i])*derrg- mu[i])) / (2.0 *((sigm*sigm))));
END FOR;

```

Figura 2.16. Programación de función de pertenencia gaussiana

El bloque creado se muestra en la Figura 2.17. La entrada de este bloque corresponde a la derivada del error, mientras que la salida entrega un arreglo de cinco vectores, cada uno con las funciones de pertenencia tipo gaussianas para la derivada del error.

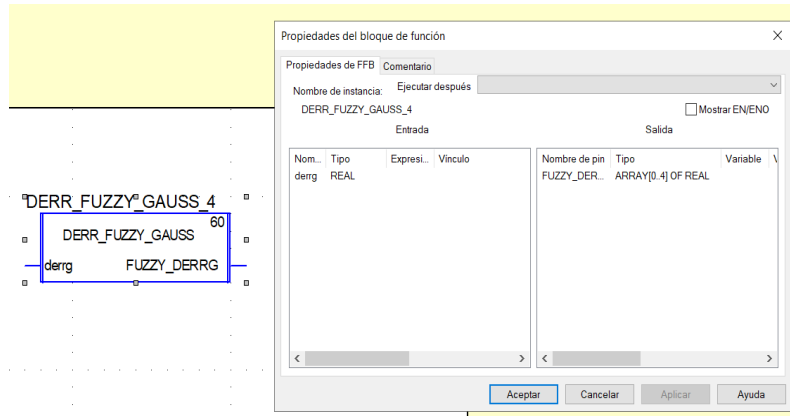


Figura 2.17. Bloque creado para las funciones de membrecía gaussianas

El mismo código se implementa en un bloque diferente para las funciones de membresía gaussianas del error.

2.4.4 Diseño de base de reglas

El conjunto de reglas establecido para el controlador se presenta en la Tabla 2.2. Estas reglas disponen de premisas que son las entradas mientras que la salida o consecuente, es la acción que se aplicará con respecto a cada premisa [33]. Entonces un ejemplo de una regla queda de la siguiente manera:

Si el error es NG y derivada del error es deNG Entonces uNG

Como se puede observar en la Tabla 2.2, el número total de reglas es la combinación del nombre de cada fila con el encabezado de cada columna. Siendo el consecuente de cada regla la intersección de estas, siendo un total de 25 reglas.

Tabla 2.2. Reglas para el control difuso

de/ e	NG	NM	Z	PM	PG
deNG	uNG	uNG	uNG	uNM	uZ
deNM	uNG	uNG	uNM	uZ	uPM
deZ	uNG	uNM	uZ	uPM	uPG
dePM	uNM	uZ	uPM	uPG	uPG
dePG	uZ	uPM	uNM	uPG	uPG

2.4.5 Mecanismo de inferencia

Para este sistema se plantea un mecanismo de inferencia tipo Takagi-Sugeno con consecuentes de orden cero o singleton. Los valores que toma cada consecuente se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores de función Singleton

Consecuente	Valor
uNG	-1
uNM	-0.5
uZ	0
uPM	0.5
uPG	1

Al establecer el controlador como un sistema MISO (Ecuación 1.6), se realiza la operación de conjuntos mediante la operación de intersección [34]. La intersección se interpreta como el cálculo del mínimo entre los valores de dos funciones de pertenencia que se cruzan.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (2.2)$$

En la Figura 2.18 se puede observar la programación en lenguaje ST de la Ecuación 2.2, implementando la operación de intersección de todas las funciones de membresía mediante dos bucles FOR.

```
FOR i:=0 TO 4 DO
FOR j:=0 TO 4 DO
Inferen[n]:=MIN(IN1 :=error inf[j], IN2 :=Derror inf[i]);
n:=n+1;
END_FOR;
END_FOR;
```

Figura 2.18. Programación de operación de intersección de conjunto difuso

En el bloque FBD denominado "INFERENCIA_FUZZY", se encuentra el algoritmo para la operación de intersección donde se obtiene el grado de pertenencia y el algoritmo de la media ponderada (Ecuación 1.7) para calcular la salida del controlador difuso.

Como se puede observar en la Figura 2.19, las entradas de este bloque son las funciones de membresía tanto del error como de la derivada del error, mientras que la salida del bloque es la salida del controlador difuso.

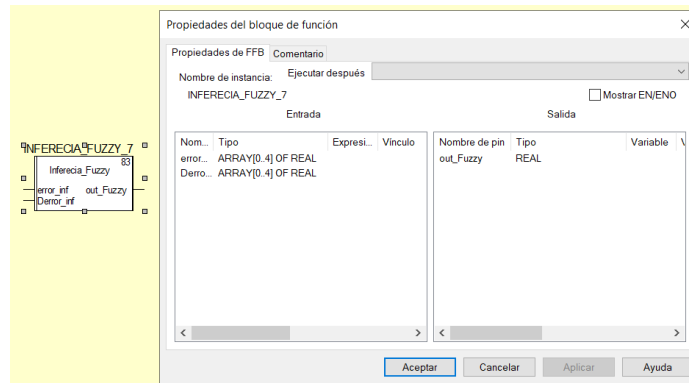


Figura 2.19. Bloque creado para el cálculo de la salida del controlador

2.4.6 Diseño de controlador PID difuso

El controlador PID difuso se programa en lenguaje FBD usando los bloques personalizados creados, además de otros bloques necesarios. En la Figura 2.20 se observa que el error es multiplicado por una ganancia kp , luego pasa por un saturador para asegurar que se mantenga en un rango normalizado de -1 a 1. Después, ingresa a los bloques de funciones de membresía tanto triangular o gaussiana. Paralelamente, el error entra a un bloque derivador llamado “DERIV_1”. La salida de la derivada del error es multiplicada por una ganancia kd , que después pasa por un saturador e ingresar a el bloque de las funciones de pertenencia triangular o gaussiana. Cada una de las dos señales de salida del cada bloque de las funciones de membresía ingresan a un bloque “INFERENCIA_FUZZY”, el cual proporciona el valor de salida del controlador difuso.

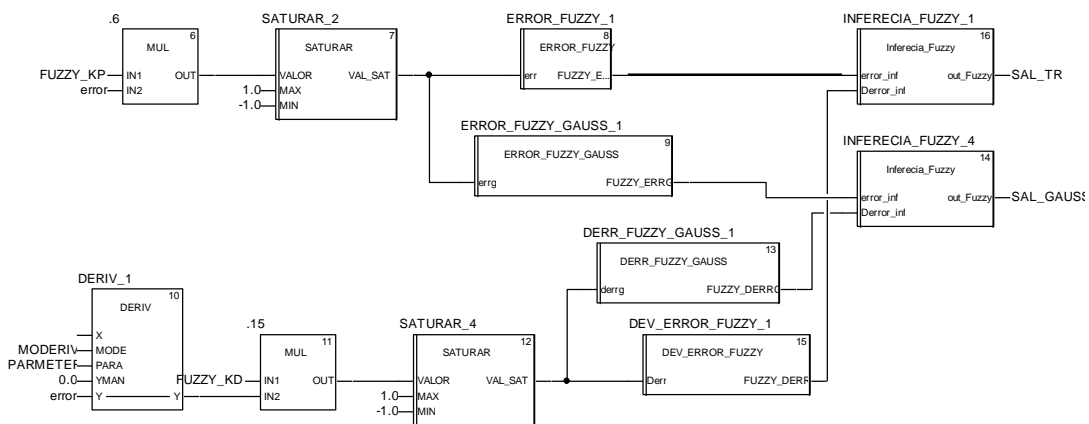


Figura 2.20. Primera parte del controlador PID difuso

En la Figura 2.21 se puede observar que la salida del control difuso pasa a la entrada de un bloque integrador llamado “INTEGRATOR1_6”. La salida integrada es multiplicada por una ganancia α y luego se suma a la multiplicación de la salida del controlador difuso con

una ganancia β . Esto da como resultado la acción de control, la cual ingresa a un bloque saturador con el fin de proteger la válvula de ingreso de líquido.

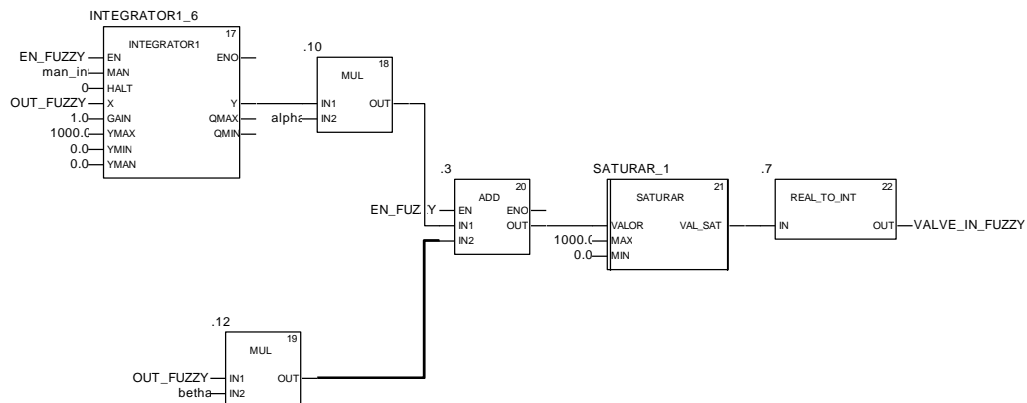


Figura 2.21. Segunda parte del controlador PID difuso

2.4.7 Ganancias Adaptativas

Con la finalidad de mejorar la respuesta del sistema, en este trabajo se propone el uso de ganancias no lineales usando la metodología propuesta en [35], donde:

$$k(e) = k_0 + k_1 \left\{ \frac{2}{1 + \exp(-k_2 e(t))} - 1 \right\} \quad (2.3)$$

Siendo k la ganancia no lineal en función del error. La modificación de los parámetros k_0 , k_1 y k_2 determina los valores máximos que puede tomar k . Como se puede observar en la Figura 2.22(b), con un valor más alto de k_2 , la ganancia k cambia significativa solo cuando el error se acerca a 0. Debido a la rapidez de la planta este comportamiento empeora la respuesta, por lo que el cambio k debe de ser más suave como en la Figura 2.22(a).

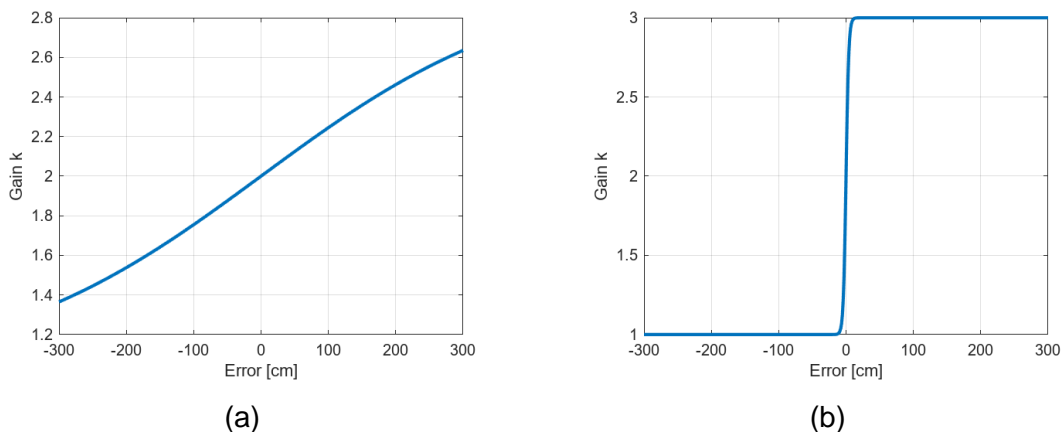


Figura 2.22. Comportamiento de la ganancia k con (a) $k_2 = 0.005$ y (b) $k_2 = 0.5$

Considerando lo antes mencionado, se selecciona un valor de $k_2 = 0.005$, mientras que para k_0 y k_1 se utilizan los valores propuestos en [35] siendo estos $k_0 = 2$ y $k_1 = 1$.

Se diseña un bloque personalizado FBD, implementado la Ecuación 2.3 mediante lenguaje ST. Como se puede observar en la Figura 2.23, este bloque tiene como entradas el error y los parámetros k_0 , k_1 y k_2 , mientras que la salida es la ganancia no lineal k .

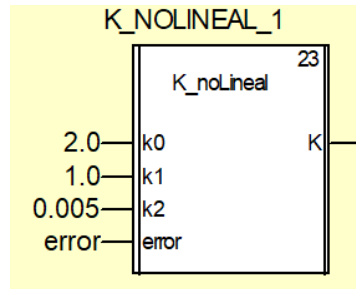


Figura 2.23. Bloque FBD creado para ganancias no lineales

2.4.8 Controlador PID difuso con ganancias adaptativas

El diagrama del controlador PID difuso propuesto se presenta en la Figura 2.24. Las ganancias k_p y k_d son no lineales ya que estas dependen de la ganancia k vista en la Ecuación 2.3. Esta ganancia no lineal es multiplicada por el error y a su vez multiplicada por las ganancias k_p y k_d convirtiendo estas en ganancias adaptativas.

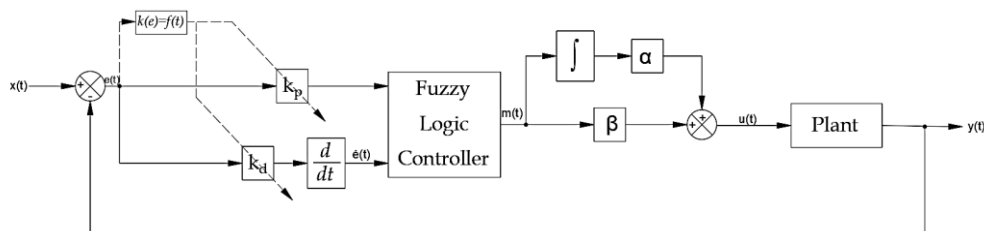


Figura 2.24. Esquema del Controlador PID difuso con ganancias adaptativas

Como resultado, la Ecuación 1.8 se transforma en la Ecuación 2.4.

$$u_{PID-Fuzzy_k(t)} = \alpha \int [(e(t)k_p k(t) + \dot{e}(t)k_d k(t))] dt + \beta [e(t)k_p k(t) + \dot{e}(t)k_d k(t)] \quad (2.4)$$

2.5 Diseño de Interfaz Gráfica

Se diseña una interfaz gráfica con dos diferentes pantallas en el software Control Expert Classic. En la pantalla mostrada en la Figura 2.25, con el interruptor (A) se puede elegir entre el controlador PID difuso y el PID convencional. Mediante (B) se modifica la referencia de nivel, en (C) y (D) se configuran cada controlador y sus parámetros. El valor de los índices de desempeño se muestra en (E) y es usado para la comparación de la respuesta de los controladores. El comportamiento del controlador y la señal de control se muestran mediante gráficas de tendencia en (G) y (H), respectivamente. Esto permite analizar al controlador de manera cualitativa y facilitar su sintonización.

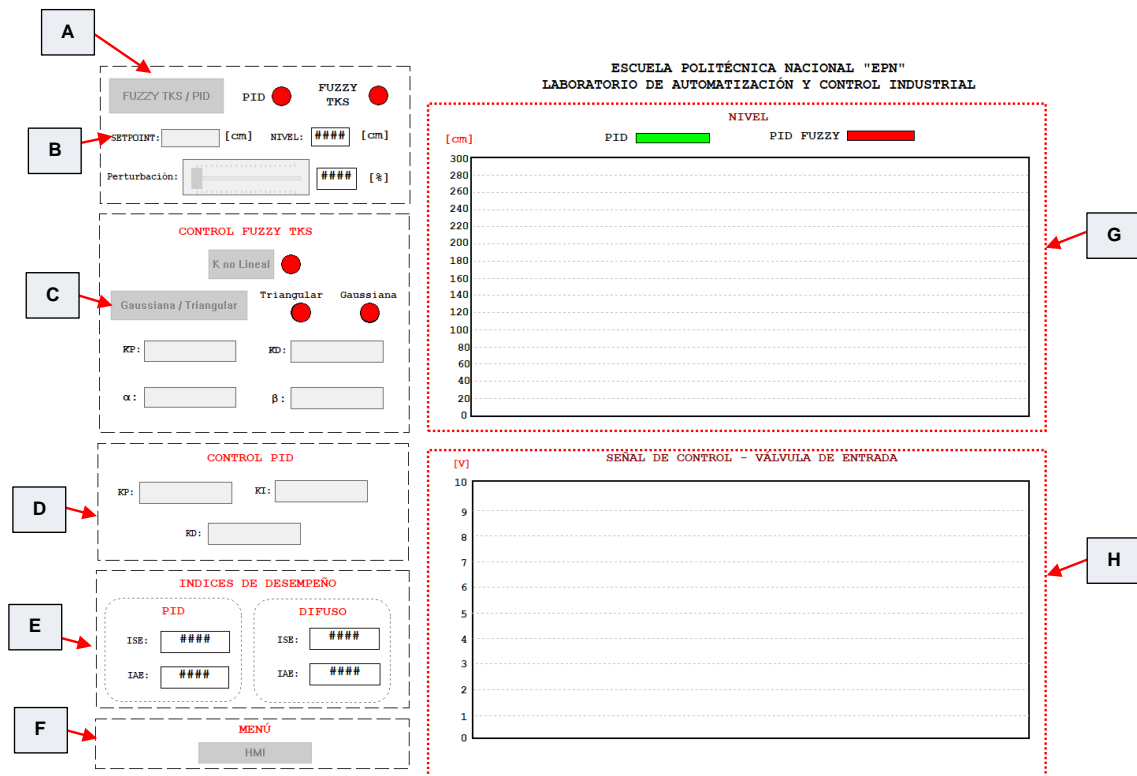


Figura 2.25. Pantalla de configuración de controladores

En la pantalla de la Figura 2.26, se observa la animación del proceso en todas sus etapas. En esta, se dispone de un panel para controlar el proceso de manera remota, mediante botones, y un slider donde se modifica el tiempo de llenado. En la misma, se dispone de indicadores que cambian su estado dependiendo la etapa del proceso, y también se muestra el número de botellas terminadas. Existe una alarma de nivel visual cuando el nivel en el tanque no es óptimo, es decir, cuando está por encima o por debajo del 20% de la referencia. Se muestra otra alarma visual cuando la banda transportadora presenta un fallo. Por último, existe un menú que permite la navegación entre las pantallas disponibles.

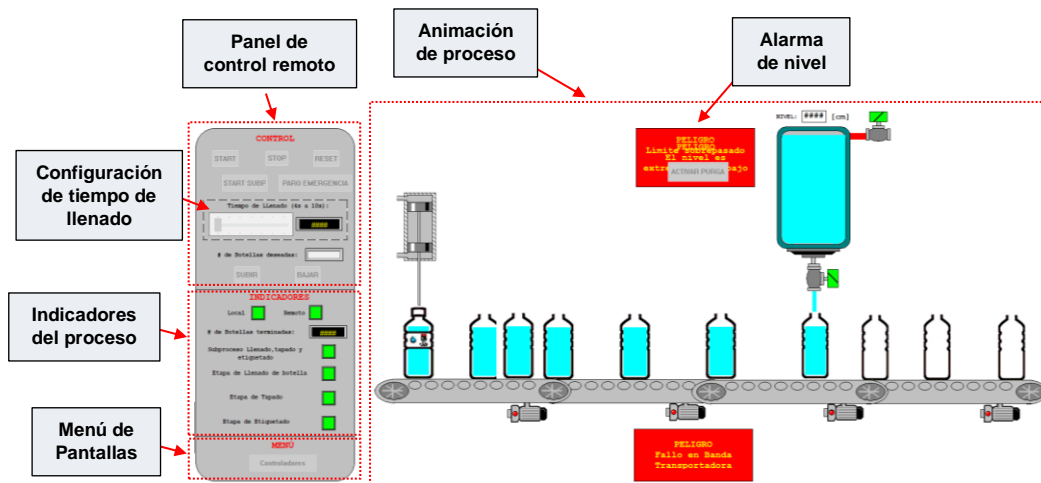


Figura 2.26. Pantalla de animación del proceso

El módulo didáctico virtual completo se muestra en la Figura 2.27. En este se controla el tanque de nivel y el subproceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas, utilizando los diseños presentados en este capítulo.

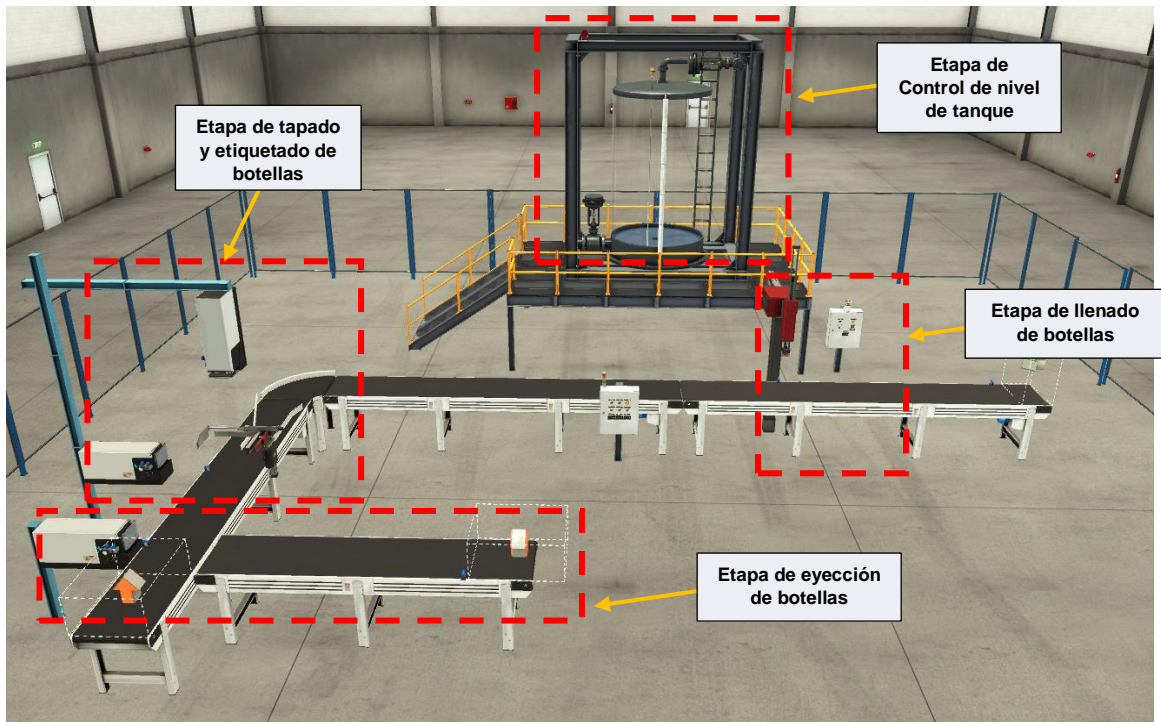


Figura 2.27. Módulo didáctico virtual realizado en Factory I/O

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Comportamiento del Controlador

En este capítulo se presentan diferentes tipos de pruebas para analizar y validar el comportamiento del controlador PID difuso con sus distintas variaciones, al compararlo con un controlador PID convencional.

La primera prueba se realiza cambiando la referencia del nivel sin perturbaciones, en la segunda prueba se realizan cambios en la referencia del nivel y se añade una perturbación constante correspondiente a la apertura de la válvula de descarga durante toda la operación del sistema.

Finalmente, la tercera prueba consiste en aplicar una perturbación temporal que afecte al sistema bruscamente. Además, se implementa el cálculo de tres distintos índices de desempeño: el ISE (Integral Square Error), que es más sensible y penaliza errores grandes; el IAE (Integral Absolute Error), que es más sensible y penaliza errores pequeños; y el

ISCO (Integral Square Control Output), que evalúa la agresividad o cantidad de energía requerida por la señal de control. Estos índices se utilizan conjuntamente para evaluar de una manera cuantitativa el desempeño de los controladores.

Para todas las pruebas realizadas se utilizan los mismos valores de parámetros (ganancias) en los controladores, los cuales se presentan en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Parámetros del Controlador PID

Parámetro del controlador	Valor
k_p	29.4
k_i	4.5
k_d	0.3

Tabla 3.2. Parámetros del Controlador PID Difuso

Parámetro del controlador	Valor
k_p	0.00334
k_d	0.000166
α	725
β	6100

Para facilitar el entendimiento de las gráficas comparativas de los controladores, en la Tabla 3.3 se presentan las leyendas y su respectivo significado de cada uno de los controladores.

Tabla 3.3. Significado de leyendas de las figuras comparativas

Leyenda en las figuras	Significado
CFAT	Control Fuzzy Adaptativo con funciones de Pertenencia Triangulares
CFNAT	Control Fuzzy No Adaptativo con funciones de Pertenencia Triangulares
CFAG	Control Fuzzy Adaptativo con funciones de Pertenencia Gaussianas
CFNAG	Control Fuzzy No Adaptativo con funciones de Pertenencia Gaussianas
PID	Control PID

3.1.1.1 Cambio de nivel de referencia sin perturbación

Esta prueba consiste en cambiar la referencia de nivel a los 6 segundos de haber iniciado el funcionamiento de la planta, estableciéndola en un valor 115 cm. Posteriormente, a los 37 segundos se aumenta la referencia a 250 cm.

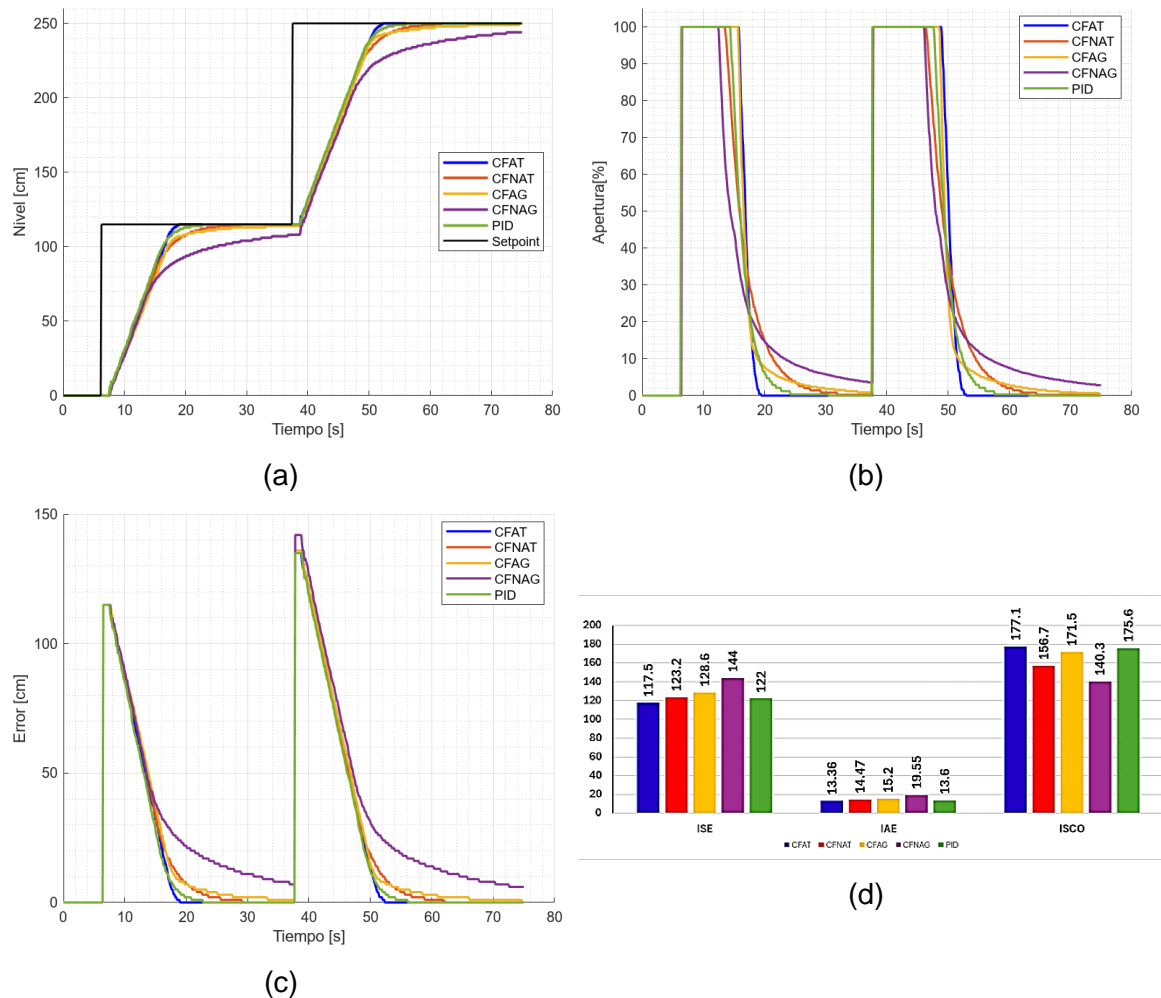


Figura 3.1. Gráficas de cambio de referencia sin perturbación: (a) Respuesta de los controladores (b) Acción de control, (c) Error de los controladores, (d) Índices de desempeño

En la Figura 3.1(a), se observa que todos los controladores llegan a la referencia deseada, a excepción del CFNAG, y esto es debido a la lentitud de su respuesta. Con ayuda de la Figura 3.1(c), se puede confirmar que este controlador es el que tiene más error de nivel, con un valor de error de 6cm.

Por otro lado, la mejor respuesta es la del CFAT, que alcanza más rápido a la referencia, lo que se refleja en una señal de control más agresiva, como se puede observar en la Figura 3.1(b). Estos resultados se contrastan con los índices de desempeño que se observan en la Figura 3.1(d), donde el CFAT muestra un menor índice de IAE e ISE, lo que indica que tiene un mejor desempeño cuando el error es grande o pequeño. El controlador

que tiene el mejor ISCO es el CFNAG, ya que su respuesta es más lenta y suave; sin embargo, es importante recalcar que este controlador no logra alcanzar la referencia deseada durante el tiempo considerado para la experimentación.

3.1.1.2 Cambio de nivel de referencia con perturbación

Esta prueba se realiza cambiando la referencia de un nivel alto a un nivel bajo. Inicialmente, se activa la perturbación (se abre la válvula de descarga V2 al 40%) para, a los 6 segundos de haber iniciado, cambiar la referencia a 210 cm, y a los 70 segundos, se vuelve a cambiar el nivel de referencia a 125 cm.

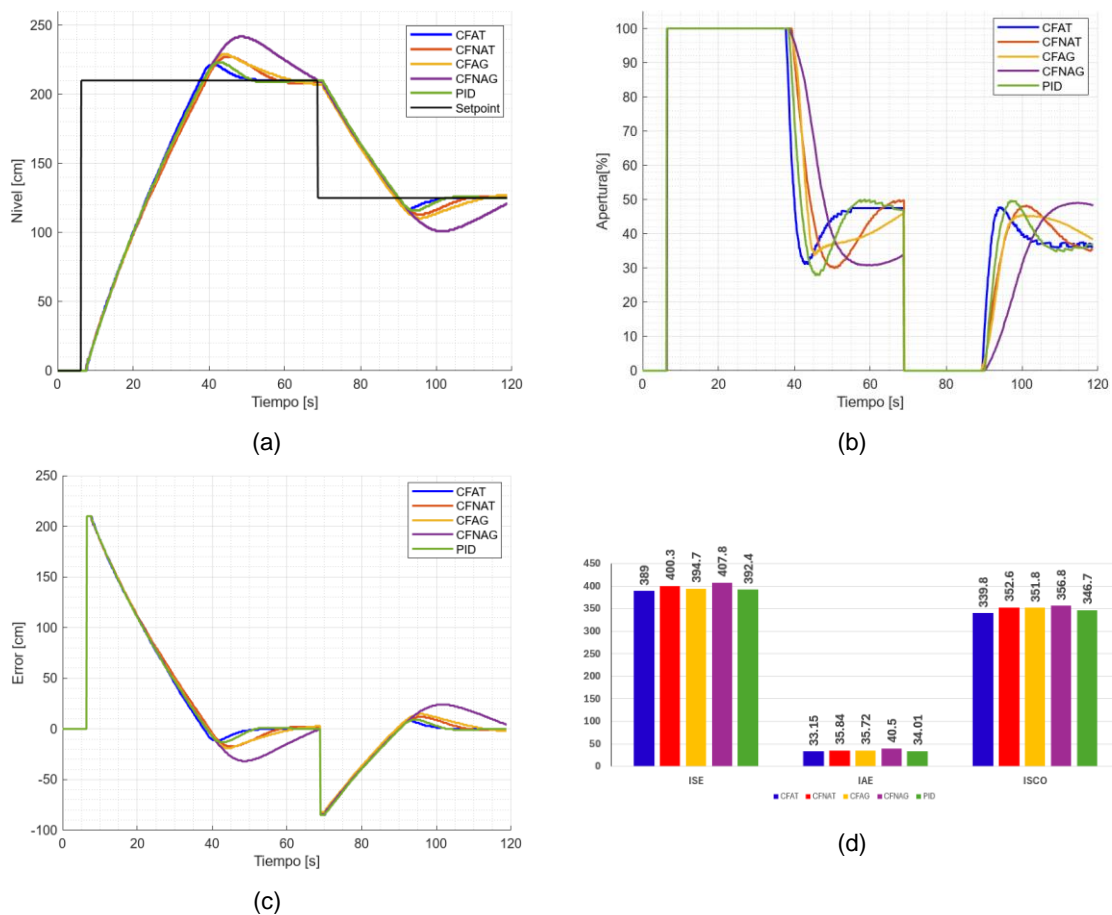


Figura 3.2. Gráficas de cambio de referencia con perturbación: (a) Respuesta de los controladores (b) Acción de control, (c) Error de los controladores, (d) Índices de desempeño

En la Figura 3.2(a), se observa que la mejor respuesta sigue siendo la del CFAT, ya que presenta un menor sobreimpulso y no presenta subimpulsos, alcanzando la referencia más rápido que los otros controladores. Como se muestra en la Figura 3.2(c), la peor respuesta la presenta el CFNAG. Este controlador, en el primer cambio de referencia, apenas alcanza el nivel deseado, mientras que en el segundo cambio de referencia no lo logra, presentado

un error de nivel de 2cm. En la Figura 3.2(d), se observa que el mejor controlador es el CFAT, debido a que tiene los valores más bajos de ISE e IAE. Aunque es importante destacar que los valores de estos índices de desempeño son bastante cercanos entre todos los controladores. El CFAT también presenta el menor ISCO, lo que indica que su señal de control es menos brusca y más eficiente.

3.1.1.3 Rechazo a perturbaciones

En esta prueba, se mantiene una referencia de nivel a 170 cm. A los 50 segundos, se aplica una perturbación que consiste en la apertura de la válvula de salida V2 al 70%.

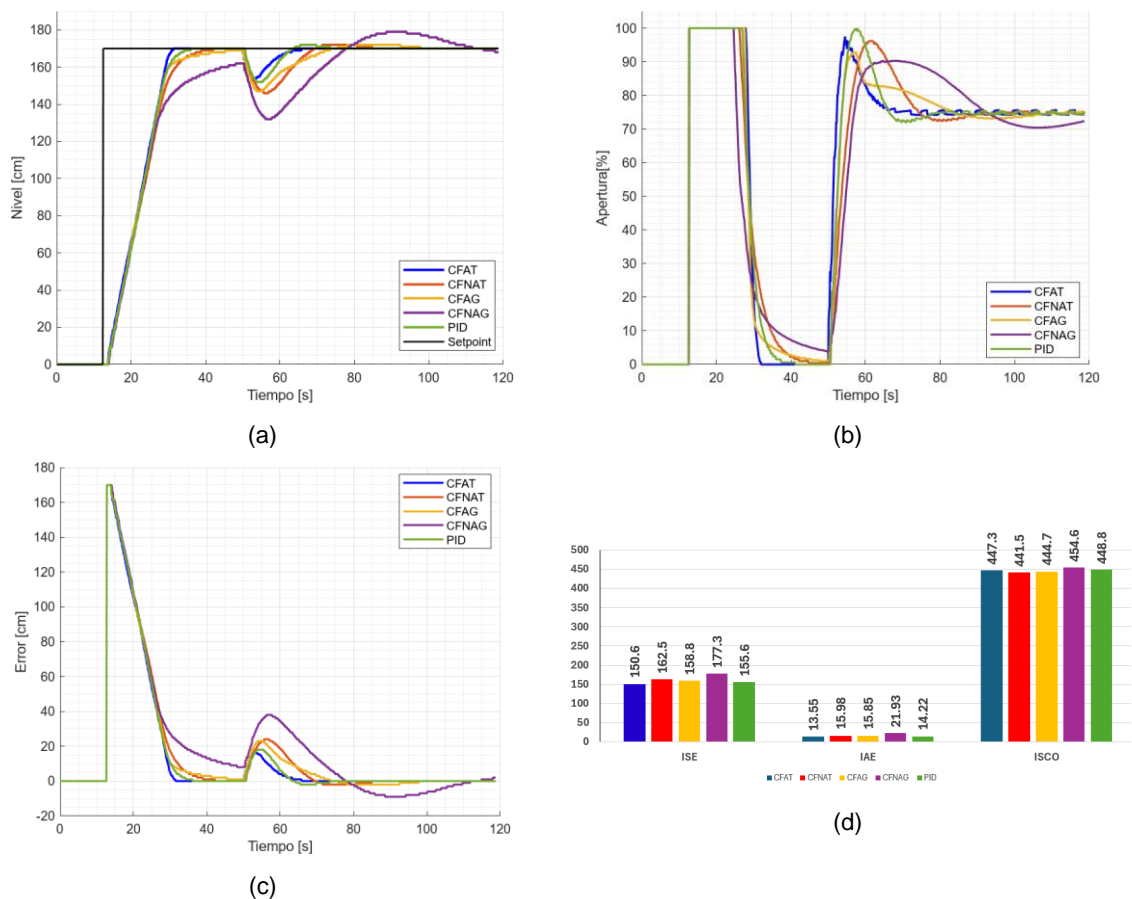


Figura 3.3. Gráficas con referencia estable y perturbación: (a) Respuesta de los controladores (b) Acción de control, (c) Error de los controladores, (d) Índices de desempeño

En la Figura 3.3(a), se observa que el CFAT sigue siendo el controlador más rápido, ya que logra contrarrestar la perturbación de manera más veloz, además de ser el único que no presenta sobreimpulso. Como se puede observar en la Figura 3.3(c), el CFNAG no logra reducir su error hasta el final de la prueba, lo que indica que este controlador es el que más error de nivel presenta.

En la Figura 3.3(b), la señal de control del CFAT es más brusca que la del PID, presentando algunos picos, esto se puede contrastar con el índice de desempeño ISCO mostrado en la Figura 3.3(d). Además, los valores de ISE e IAE comprueban que el mejor controlador es el CFAT, ya que presenta los valores más bajos, lo que indica que su respuesta destaca cuando el error es grande o pequeño.

3.1.2 Pruebas del Módulo didáctico virtual

3.1.2.1 Pruebas de Funcionalidad Básica

El objetivo de esta prueba es verificar que los sensores y actuadores del sistema se activan y desactivan correctamente, validando que los dispositivos controlados por el PLC Modicon M580 se activen y detengan según lo programado. Durante la prueba, se activa y desactiva cada sensor individualmente, observando las respuestas del PLC. Luego, se envían señales desde el PLC para activar y desactivar cada actuador, comprobando su correcto funcionamiento. En la Tabla 3.4 se muestra la validación de cada componente del módulo didáctico virtual asegurando que la planta opera de manera fiable y conforme a lo diseñado.

Tabla 3.4. Prueba de funcionalidad de equipos

Equipo	Tipo	Estado de funcionamiento
Válvula de Entrada V1	Analógico	<input checked="" type="checkbox"/>
Válvula de salida V2	Analógico	<input checked="" type="checkbox"/>
Sensor de nivel LS	Analógico	<input checked="" type="checkbox"/>
Sensor de ingreso PS1	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Sensor de llenado PS2	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Posicionador MB1	Analógico	<input checked="" type="checkbox"/>
Sensor de tapado y etiquetado PS2	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Sujetador de posición MS	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Cilindro neumático de tapado CN1	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Cilindro neumático de etiquetado CN2	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Sensor de eyección PS4	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Cilindro neumático de eyección CN3	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Banda transportadora de llenado, tapado y etiquetado BC1	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Banda transportadora de eyección BC2	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Alarma sonora AS	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Luz de emergencia EL	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Torre de señalización TS	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Pulsadores (SM1,SM2,SP1,SP2,RP,SA,SD)	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Botón de emergencia (ES1,ES2)	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Selector de dos posiciones PS	Digital	<input checked="" type="checkbox"/>
Displays (DD1,DD2,DD3,DD4)	Analógico	<input checked="" type="checkbox"/>

3.1.2.2 Pruebas de secuencia de operaciones y de integración

En esta prueba se ejecuta el proceso completo para verificar que las operaciones ocurren en el orden correcto. Asegurando que la programación cumpla con el control de nivel del tanque, y validando la secuencia del llenado, tapado y finalmente, el etiquetado de las botellas.

Para estas pruebas, primero se modifica la referencia a 215cm y se escoge el mejor controlador que es el CFAT. Después, se pulsa el botón de marcha SM1.

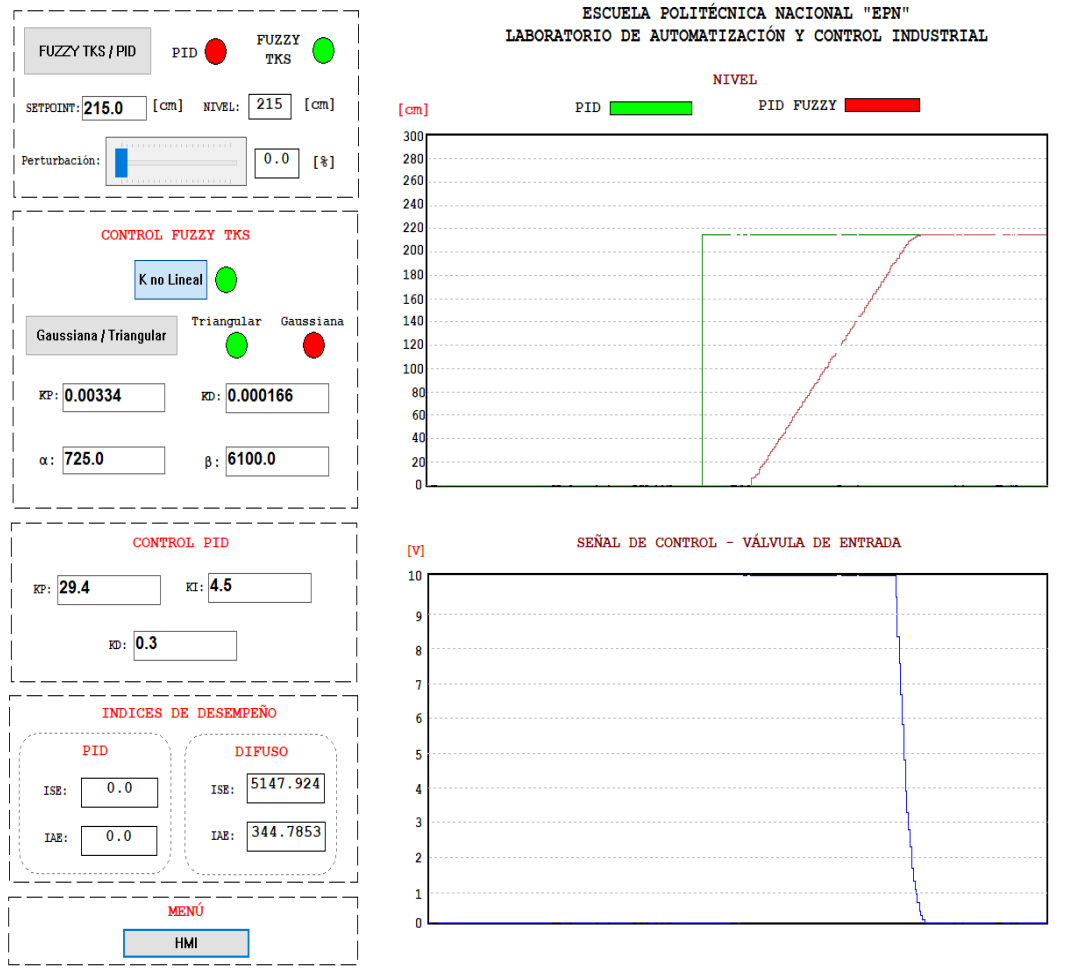


Figura 3.4. Interfaz gráfica de los controladores

Como se puede observar en la Figura 3.3, el nivel alcanza la referencia deseada. Una vez llenado el tanque, sigue la etapa de llenado de botellas.

Como se puede observar en la Figura 3.5, el sensor PS2 detecta la botella. Entonces, el brazo del posicionador MB1 baja y la válvula de salida V2 se abre durante el tiempo previamente establecido.

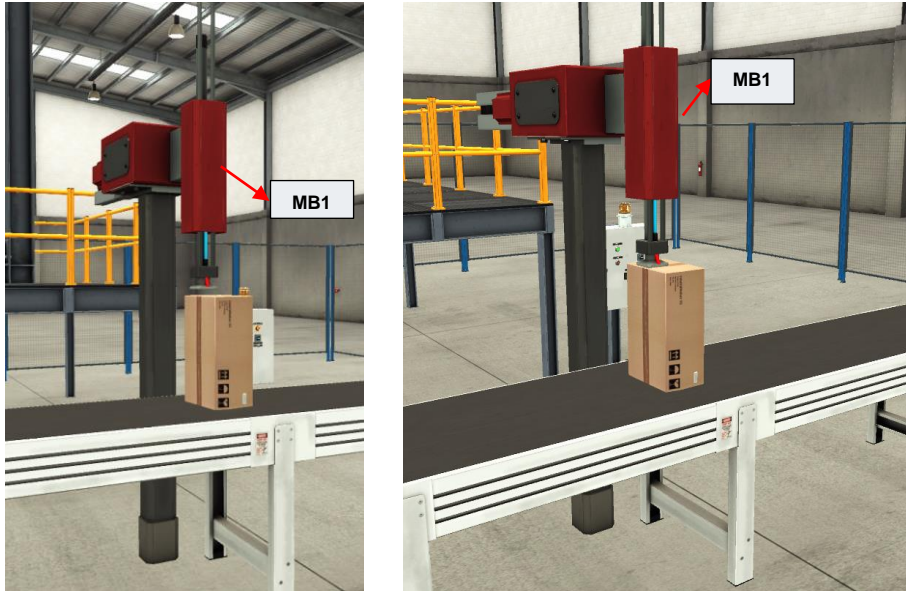


Figura 3.5. Etapa de llenado de botellas

El llenado de las botellas también se puede observar en la pantalla de la interfaz gráfica del controlador. En la Figura 3.6 se puede observar que existen perturbaciones cada vez que se llena una botella, por lo que el controlador compensa la pérdida de nivel al actuar sobre la válvula de ingreso V1.

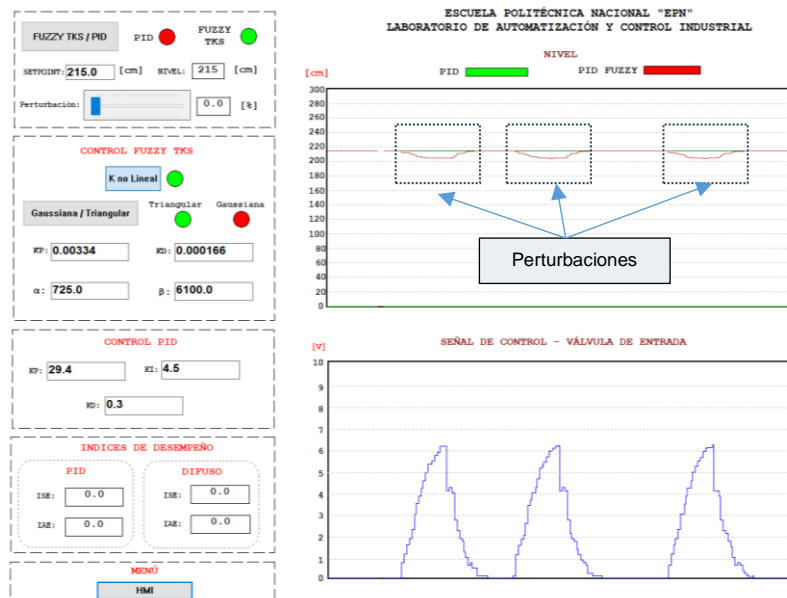


Figura 3.6. Pantalla del controlador en etapa de llenado

En la otra pantalla del HMI (Figura 3.7) se muestra el proceso animado del llenado. Durante esta fase, aparece una representación de la botella debajo del tanque. Además, en la parte izquierda, el indicador cambia de color rojo a verde para señalar que se encuentra en esta etapa.

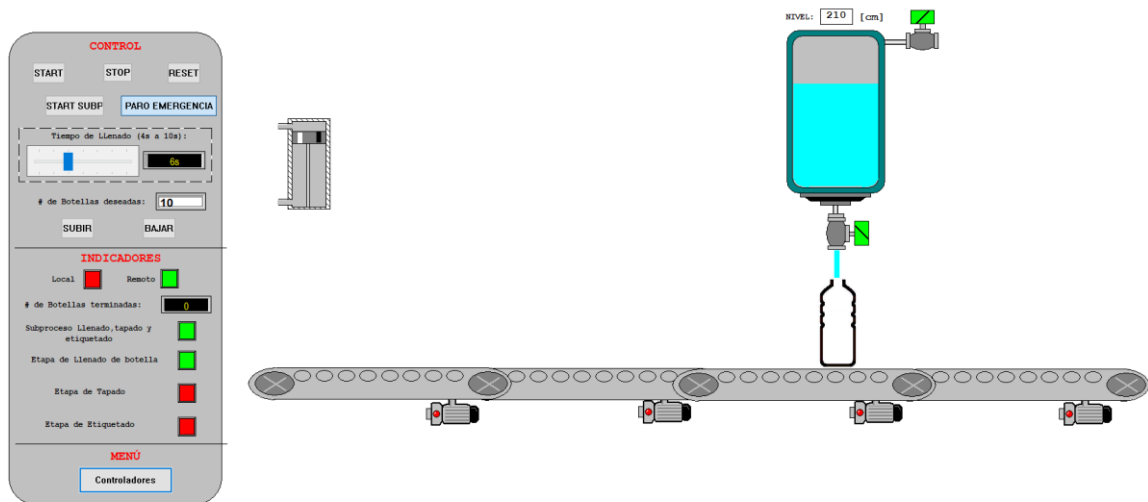


Figura 3.7. Etapa de llenado en HMI

En la Figura 3.8(a) los equipos de la fase de tapado están en posición inicial. Después como en la Figura 3.8(b), el sensor PS3 detecta la botella, el sujetador MS baja, permitiendo que el vástago del cilindro neumático CN1 descienda (Figura 3.8(c)) y asciende simulando el tapado.

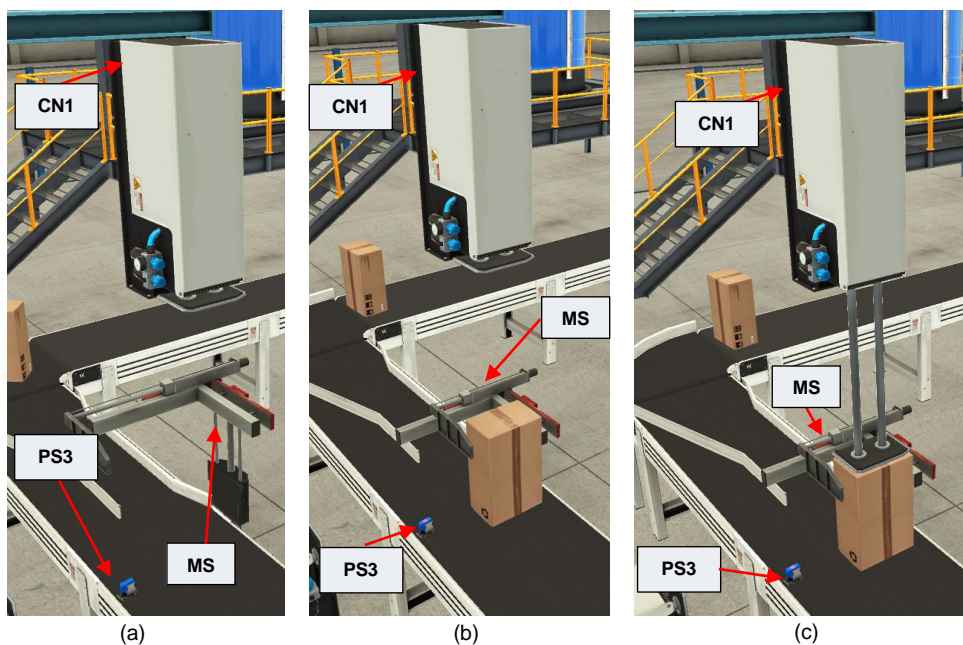


Figura 3.8. Etapa de tapado en Factory I/O

En la Figura 3.9 se puede observar el proceso animado del tapado en el HMI, donde el cilindro neumático CN1 animado se acciona. Además, en la parte izquierda se encenderá el indicador que señala que el proceso se encuentra en esta fase. Cuando termine esta etapa, la botella animada aparecerá con una tapa.

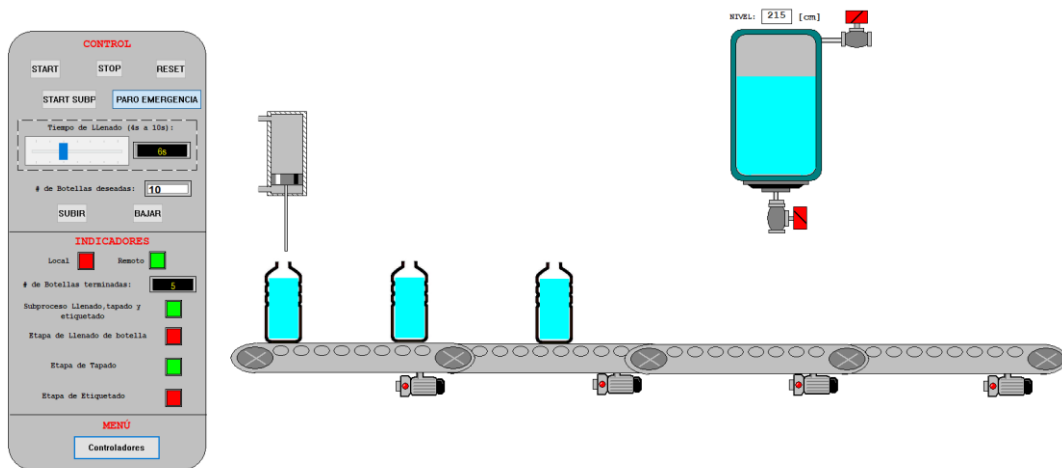


Figura 3.9. Etapa de sellado en HMI

En la etapa de etiquetado, el cilindro neumático CN2 que se muestra en la Figura 3.10, extiende su vástago solo después de completarse la fase de tapado. Finalmente, el vástago y el sujetador MS vuelve a su posición inicial, lo que significa que se ha completado la fase de etiquetado.

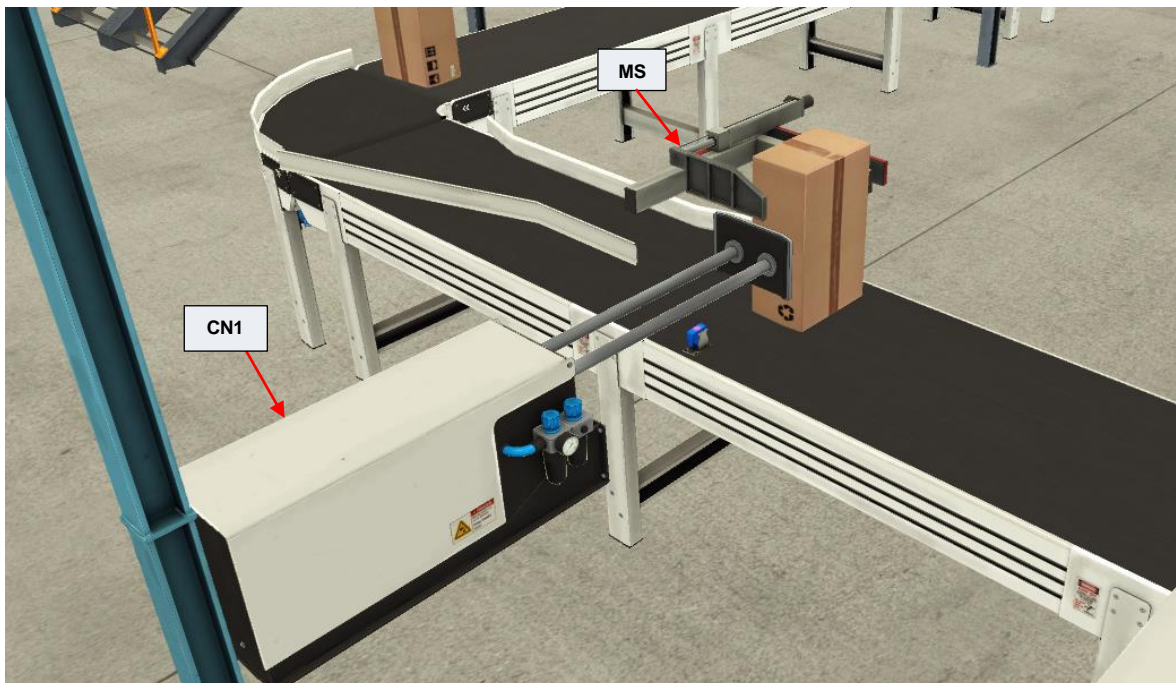


Figura 3.10. Etapa de etiquetado en Factory I/O

En la etapa de etiquetado mostrada en el HMI (Figura 3.11), solo se visualiza el indicador verde en la parte izquierda de la pantalla para indicar que el proceso se encuentra en esta fase. Además, al finalizar esta etapa, la botella animada aparecerá con una etiqueta.

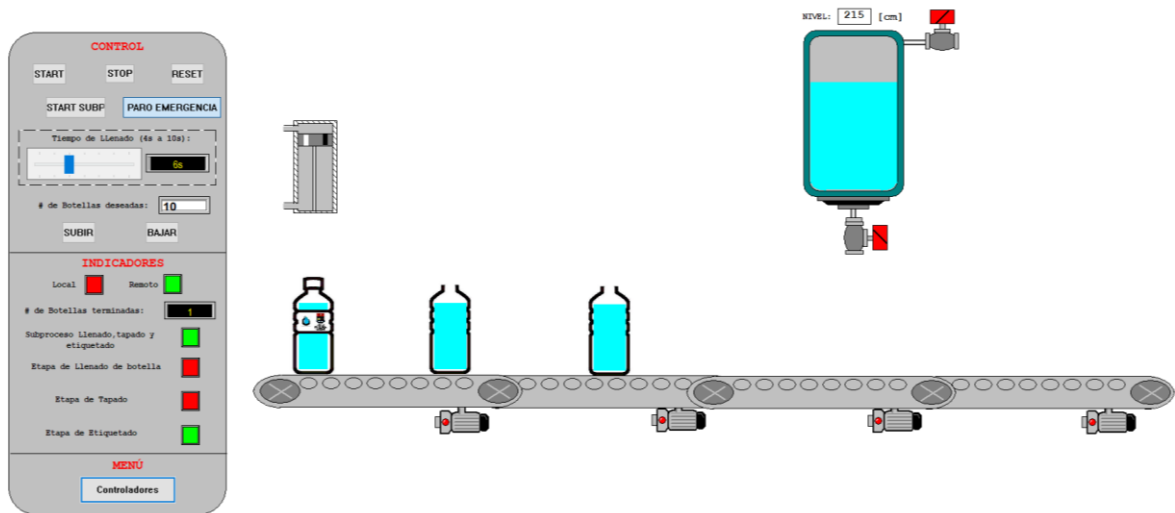


Figura 3.11. Etapa de etiquetado en HMI

Al finalizar el subproceso de llenado, tapado y etiquetado, una forma de validar el funcionamiento es a través del tablero de control mostrado en la Figura 3.12. Para que el proceso se considere completo, el número mostrado en el display DD2, que indica el número de botellas deseadas, debe ser igual al número mostrado en el display DD3 y DD4. El display DD3 muestra el número de botellas llenadas, mientras que el display DD4 muestra el número de botellas que han sido tanto tapadas y etiquetadas. Además, en la torre de señalización TS, la luz roja debe de estar encendida, lo que indica que el proceso está detenido, mientras que la luz verde indica que se han procesado todas las botellas deseadas.



Figura 3.12. Tablero de control en Factory I/O.

3.1.2.3 Pruebas de temporización

A través de esta prueba se busca garantizar que el sistema controlado por el PLC Modicon M580 complete las operaciones dentro de los tiempos requeridos, midiendo los tiempos específicos de cada proceso y el tiempo total del ciclo. Para esta prueba se considera tiempo de llenado mínimo (4 segundos) y máximo (10 segundos), así como un número total de 10 botellas deseadas.

En la Tabla 3.5 se pueden observar los tiempos medidos considerando un tiempo de llenado de botellas mínimo.

Tabla 3.5. Prueba de temporización con tiempo de llenado mínimo

# de botellas Deseadas	10		
Tiempo de llenado configurado	4s		
Etapa	Tiempo por botella	Estado de operación	# de botellas completadas
Llenado	4.28s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Tapado	6.5s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Etiquetado	3.5s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Tiempo total	240s		

Mientras que en la Tabla 3.6 se muestran los tiempos medidos considerando un tiempo de llenado de botellas máximo.

Tabla 3.6. Prueba de temporización con tiempo de llenado máximo

# de botellas Deseadas	10		
Tiempo de llenado configurado	10s		
Etapa	Tiempo por botella	Estado de operación	# de botellas completadas
Llenado	10.3s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Tapado	6.5s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Etiquetado	3.5s	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Tiempo total	345s		

3.1.2.4 Pruebas de seguridad y fallos

Paro del llenado: En la Figura 3.13 se puede observar un pequeño pico en la señal de control, esto se debe a que el proceso se detuvo al momento del llenado de una botella. Al pulsar nuevamente el botón de marcha SM1, se completa el llenado de la botella con el tiempo restante, lo que ocasiona una señal de control diferente a la normal.

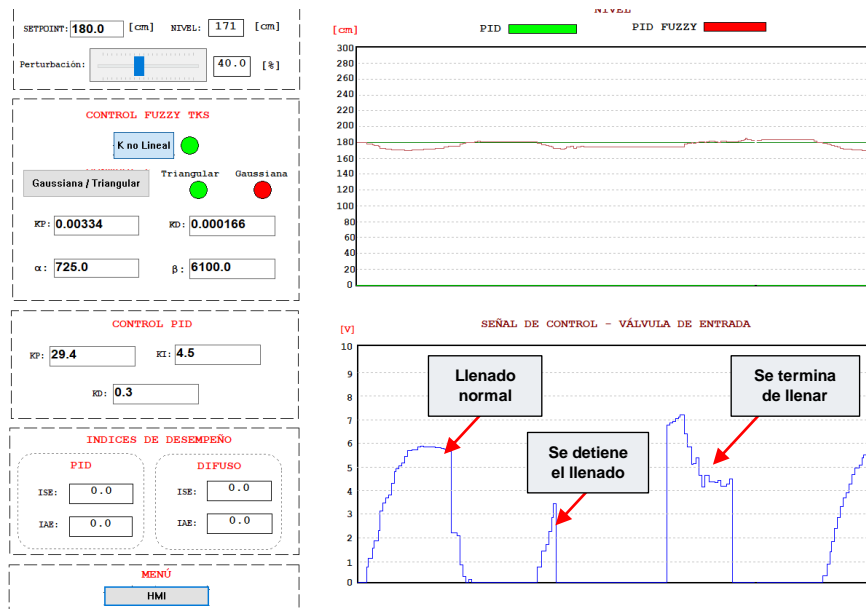


Figura 3.13. Comportamiento del controlador en paro

Reseteo: Al momento de pulsar el botón de reseteo RP, todas las botellas que se encuentran presentes en la banda transportadora son desechadas, a excepción de las que ya han completado todas las etapas de llenado, tapado y etiquetado. Además, el tanque se tiene que vaciar completamente. Como se observa en la Figura 3.14, el cilindro neumático CN3 es responsable de mover las botellas a la otra banda transportadora para posteriormente desechárlas.

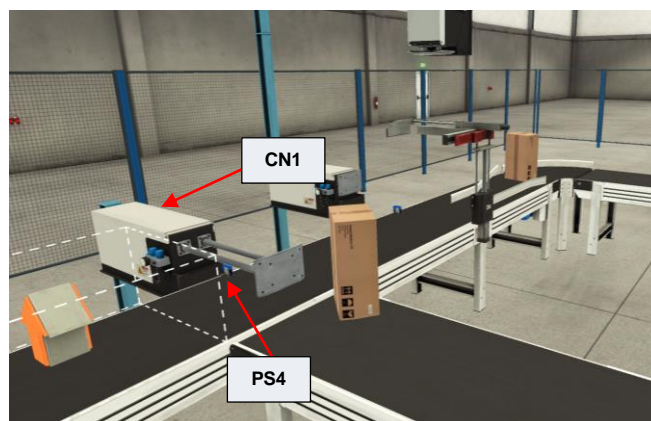


Figura 3.14. Eyección de botellas en el reseteo

Fallo de nivel: Un fallo de nivel se presenta cuando la válvula de entrada V1 no realiza su respectivo control y aumenta el nivel más del 20% de la referencia. Cuando ocurra este fallo, en el módulo didáctico virtual se activará la sirena AS mientras que en el HMI (Figura 3.15) se muestra una alarma visual del fallo de nivel. Como consecuencia, el proceso se detiene y para iniciar nuevamente el proceso, es necesario reducir el nivel. Esto se realiza mediante el botón que se muestra en la alarma del HMI.

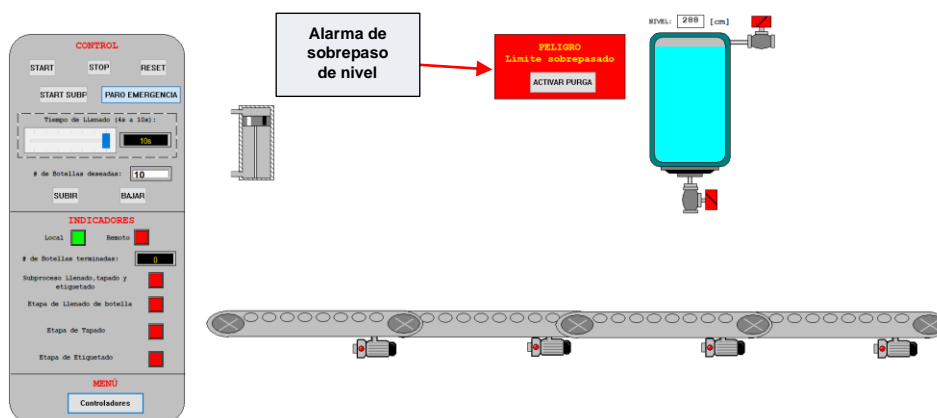


Figura 3.15. Fallo de nivel en HMI

3.1.3 Implementación con elementos físicos

En el laboratorio de Control Industrial, se replican los controles de los tableros virtuales de Factory I/O en el tablero físico. Para ello, se conectan pulsadores a la entrada del PLC, mientras que a la salida se encuentran las luces piloto, una torre de señalización y un motor de inducción trifásico. En la Figura 3.16 se observa el sistema completo, donde se muestra el módulo didáctico virtual en Factory I/O, la interfaz gráfica en Control Expert y el tablero físico de control con los elementos antes descritos.

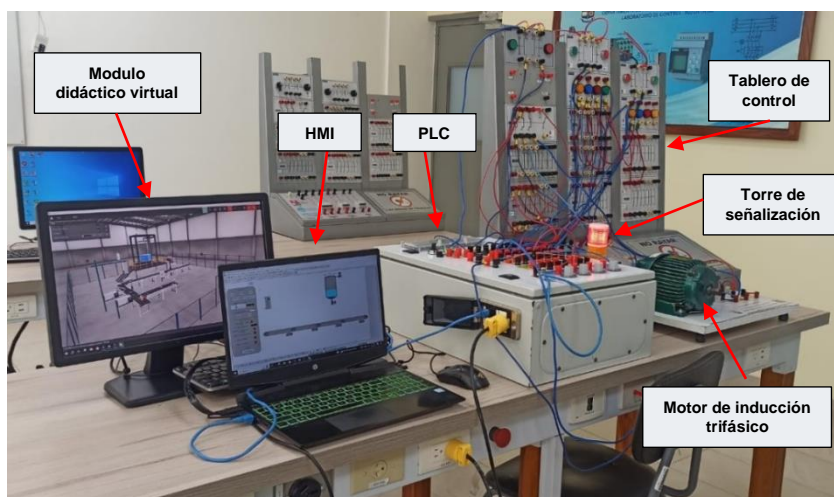


Figura 3.16. Implementación del sistema con elementos físicos

3.2 CONCLUSIONES

La revisión detallada de los componentes disponibles en el software Factory I/O ha permitido identificar los elementos necesarios para desarrollar el módulo didáctico virtual. Debido a la limitación de equipos disponibles y gracias a esta revisión, se han empleado otros objetos para simular un sistema de control de nivel, integrando los procesos de llenado, tapado y etiquetado de botellas.

El software Factory I/O permite crear módulos didácticos virtuales para validar la programación del control de procesos industriales mediante un PLC. Este software permitió validar la programación de los controladores de nivel, así como el funcionamiento del subproceso que consta de llenado, tapado y etiquetado de botellas. Como resultado, el control de nivel alcanza el valor de referencia, y todas las botellas deseadas completan satisfactoriamente las etapas de llenado, tapado y etiquetado.

La revisión bibliográfica sobre controladores difusos contribuye al entendimiento para lograr su diseño. Se consideran los componentes necesarios planteados por el sistema difuso para implementar el algoritmo de control en un PLC, siendo estos, las funciones de membresía, las reglas difusas, el mecanismo de inferencia y la defusificación.

El controlador difuso adaptativo con funciones de pertenencia triangulares muestra la mejor respuesta en todas las pruebas realizadas. En la prueba de cambios ascendentes de referencia sin perturbación, resulta ser el más veloz. En cambios descendentes de referencia, donde la perturbación ocurre desde el inicio, muestra la mejor respuesta con un sobreimpulso más pequeño y siendo el único controlador que no presenta subimpulsos. Mientras que, en la prueba con un nivel ya estable y una perturbación grande, también es el único que no presenta subimpulsos ni sobreimpulsos.

Los índices de desempeño ISE y IAE proporcionan una forma cuantitativa de analizar el desempeño de los controladores. Estos dos índices se aplican al error. El ISE, al tener mayor sensibilidad a errores grandes, indica el controlador con una mejor respuesta transitoria, mientras que el IAE, más sensible a errores pequeños, señala una mejor respuesta en estado estable. Además, es fundamental analizar la señal de control, y para esto el ISCO ofrece un análisis del comportamiento de dicha señal."

Con los índices de desempeño ISE e IAE, se comprueba que el mejor controlador es el controlador difuso adaptativo con funciones de pertenencia triangulares, ya que presenta los valores más pequeños, lo que indica un mejor desempeño tanto para errores grandes como pequeños. En cambio, en dos de las pruebas, el índice ISCO muestra que este

controlador no tiene la mejor señal de control. Sin embargo, esto no es muy relevante, ya que los valores de ISCO de los otros controladores están muy cerca entre sí. Además, se puede afirmar que la señal de control es un poco más agresiva, ya que la respuesta del controlador es la más rápida.

El uso de ganancias adaptativas en los controladores difusos implementados refleja una mejoría notable en la respuesta. En las gráficas mostradas en la parte de resultados se observa que el controlador difuso no adaptativo con funciones de pertenencia gaussianas no siempre alcanza a la referencia ya que requiere más tiempo, a diferencia del controlador adaptativo del mismo tipo que logra una respuesta más rápida alcanzando a la referencia y estableciéndose antes que los otros.

La interfaz gráfica es una parte importante de este trabajo, ya que ayuda en el control del proceso mediante un control remoto, y permite la visualización del estado de sus etapas. Además, facilita la sintonización de los controladores al permitir ajustar sus parámetros de manera intuitiva al observar el comportamiento del controlador y la señal de control en tiempo real.

Controlar y supervisar el proceso mediante un tablero físico como en un tablero virtual nos permite visualizar la adaptabilidad del módulo didáctico virtual. Haciendo que la planta sea más realista al permitir realizar las conexiones de entrada y salida del PLC, además de ofrecer un mejor análisis de la eficiencia y operación de la planta implementada.

3.3 Recomendaciones

Para plantas que tienen procesos extensos y secuenciales, es recomendable tener un PLC que admita distintos tipos de lenguajes, ya que al combinar estos lenguajes hace más fácil la programación.

Al utilizar el lenguaje FBD es importante categorizar la programación en distintas secciones según su funcionalidad para facilitar su análisis y detección de errores en el programa.

Es recomendable graficar la ecuación de la ganancia no lineal para optimizar sus parámetros, ya que con la gráfica se puede observar la variación de la ganancia k en función del error, permitiendo ajustarlos de manera más efectiva con la finalidad de mejorar la respuesta.

Sería interesante implementar, además del control PID difuso para el llenado del tanque, un control PID difuso para la válvula de salida. Dado que esta válvula de salida cuenta con

un sensor de flujo, se podría realizar el llenado de botellas basándose en el volumen en lugar del tiempo, optimizando así el proceso de llenado.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Astrom, "Process control--Past, present and future," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 3–10, Aug. 1985, doi: 10.1109/MCS.1985.1104958.
- [2] P. J. King and E. H. Mamdani, "The application of fuzzy control systems to industrial processes," *Automatica*, vol. 13, no. 3, pp. 235–242, 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(77\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(77)90050-4).
- [3] Kiam Heong Ang, G. Chong, and Yun Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, Jul. 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [4] Tsung-Tai Huang, Hung-Yuan Chung, and Jin-Jye Lin, "A fuzzy PID controller being like parameter varying PID," in *FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings (Cat. No.99CH36315)*, IEEE, 1999, pp. 269–276 vol.1. doi: 10.1109/FUZZY.1999.793247.
- [5] Yanan Zhao and E. G. Collins, "Fuzzy pi control design for an industrial weigh belt feeder," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 311–319, Jun. 2003, doi: 10.1109/TFUZZ.2003.812686.
- [6] M. Si Fodil, P. Siarry, F. Guely, and J.-L. Tyran, "A fuzzy rule base for the improved control of a pressurized water nuclear reactor," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2000, doi: 10.1109/91.824761.
- [7] S. Amertet, G. Gebresenbet, and H. M. Alwan, "Modeling of Unmanned Aerial Vehicles for Smart Agriculture Systems Using Hybrid Fuzzy PID Controllers," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 8, p. 3458, Apr. 2024, doi: 10.3390/app14083458.
- [8] A. Tendero-Vegas, O. Miguel-Escrig, J.-A. Romero-Pérez, B. Wiesmayr, V. Ashiwal, and A. Zoitl, "Integración de FACTORY IO y 4DIAC-FORTE para la validación de software de control en la norma IEC 61499," in *XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja)*, Servicio de Publicacións da UDC, 2022, pp. 949–955. doi: 10.17979/spudc.9788497498418.0949.
- [9] A. Balestrino, A. Landi, M. Medaglia, and M. Satler, "Performance Indices and Tuning in Process Control," in *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, IEEE, Jun. 2006, pp. 1–6. doi: 10.1109/MED.2006.328852.

- [10] “EcoStruxure™ Control Expert Lenguajes y estructura del programa Manual de referencia.” [Online]. Available: www.se.com
- [11] H. Vargas, R. Heradio, M. Donoso, and G. Farias, “Teaching automation with Factory I/O under a competency-based curriculum,” *Multimed Tools Appl*, vol. 82, no. 13, pp. 19221–19246, May 2023, doi: 10.1007/s11042-022-14047-9.
- [12] A. Philippot *et al.*, “HOME I/O and FACTORY I/O: 2 Pieces of innovative PO simulation software for automation education,” in *2017 27th EAEEIE Annual Conference (EAEEIE)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/EAEEIE.2017.8768639.
- [13] “Parts-FACTORY I/O.” Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://docs.factoryio.com/manual/parts/>
- [14] G. Iborra, “Modicon M580, Schneider primer controlador ePAC del mundo.” Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://novedadesautomatizacion.com/modicon-m580-schneider-primer-controlador-epac-del-mundo/>
- [15] K. Shipp and A. Tyler, “Senior Project Report HVAC Fan Control Using Modicon M580,” 2020.
- [16] “Botón Pulsador”, Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://electroenchufe.com/p/pulsador-con-block-1nc-rojo/>
- [17] “Luces Piloto LED CAMSCO 22mm.” Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://electricoindustrial.com.ec/producto/luces-piloto-led-camsco-22mm/>
- [18] “3POLE+1NO LC1D2510 Contactor.” Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/lc1d2510-contactor-22460078633.html>
- [19] “TORRES SEÑALIZACIÓN LED 70MM.” Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.grupoecmejia.com/torres-se%C3%B1alizaci%C3%B3n-camsco>
- [20] “Motor de inducción trifásico.” Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://amperonline.com/product/3416/>
- [21] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [22] “Control basado en lógica difusa: De los fundamentos a las aplicaciones.” *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, vol. 4, no. 2, pp. 6–37, Dec. 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.01.

- [23] P. N. Lamkhade, B. J. Parvat, and C. B. Kadu, "Design and implementation of fuzzy logic controller for level control," in *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*, IEEE, Oct. 2015, pp. 475–479. doi: 10.1109/ICESA.2015.7503395.
- [24] J. Leyva-Bravo, P. Chiñas-Sanchez, A. Hernandez-Rodriguez, and G. G. Hernandez-Alba, "Electrochemical discharge machining modeling through different soft computing approaches," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 7–8, pp. 3587–3596, Feb. 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04766-z.
- [25] V. C. Madanda, F. Sengani, and F. Mulenga, "Applications of Fuzzy Theory-Based Approaches in Tunnelling Geomechanics: a State-of-the-Art Review," *Min Metall Explor*, vol. 40, no. 3, pp. 819–837, Jun. 2023, doi: 10.1007/s42461-023-00767-5.
- [26] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, 1st ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1997.
- [27] M. Darío, A. Serna, ; Conrado, A. Serna Urán, A. Carolina, and G. Builes, "INFERENCIA DIFUSA APLICADA A LA INGENIERÍA CONCURRENTE PARA EL DISEÑO DE PRODUCTOS DE MANUFACTURA EN CONDICIONES DE INCERTIDUMBRE *."
- [28] W. G. Marroquín and J. A. López, "Control Difuso para un Sistema de Nivel Implementado en un Autómata Programable."
- [29] L. Zhu, D. Toncich, R. Nagarajah, and K. Romanski, "A PID-type fuzzy controller model for machine control applications," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, no. 10, pp. 696–707, Oct. 1997, doi: 10.1007/BF01179069.
- [30] Tsung-Tai Huang, Hung-Yuan Chung, and Jin-Jye Lin, "A fuzzy PID controller being like parameter varying PID," in *FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings (Cat. No.99CH36315)*, IEEE, 1999, pp. 269–276 vol.1. doi: 10.1109/FUZZY.1999.793247.
- [31] O. Karasakal Engin Yeşil Müjde Güzelkaya, O. Karasakal, E. Yes, and I. Eks, "Implementation of a New Self-Tuning Fuzzy PID Controller on PLC," 2005.
- [32] H. Vargas, R. Heradio, M. Donoso, and G. Farias, "Teaching automation with Factory I/O under a competency-based curriculum," *Multimed Tools Appl*, vol. 82, no. 13, pp. 19221–19246, May 2023, doi: 10.1007/s11042-022-14047-9.

- [33] O. W. Abdulwahhab, "USING FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR A TWO-TANK LEVEL CONTROL SYSTEM." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319276123>
- [34] S. Diciembre, "Fundamentos de los Conjuntos Difusos," Universitat Jaume I, Castellon de la Plana, 2022.
- [35] H. Seraji and J. Wiley, "A New Class of Nonlinear PID Controllers with Robotic Applications," John Wiley & Sons, Inc, 1611.

5 ANEXOS

ANEXO I. Manual del programa

i) Se conecta los elementos del tablero físico, la torre de señalización y el motor de inducción trifásico al PLC, considerando las direcciones según lo mostrado en la Figura 1.

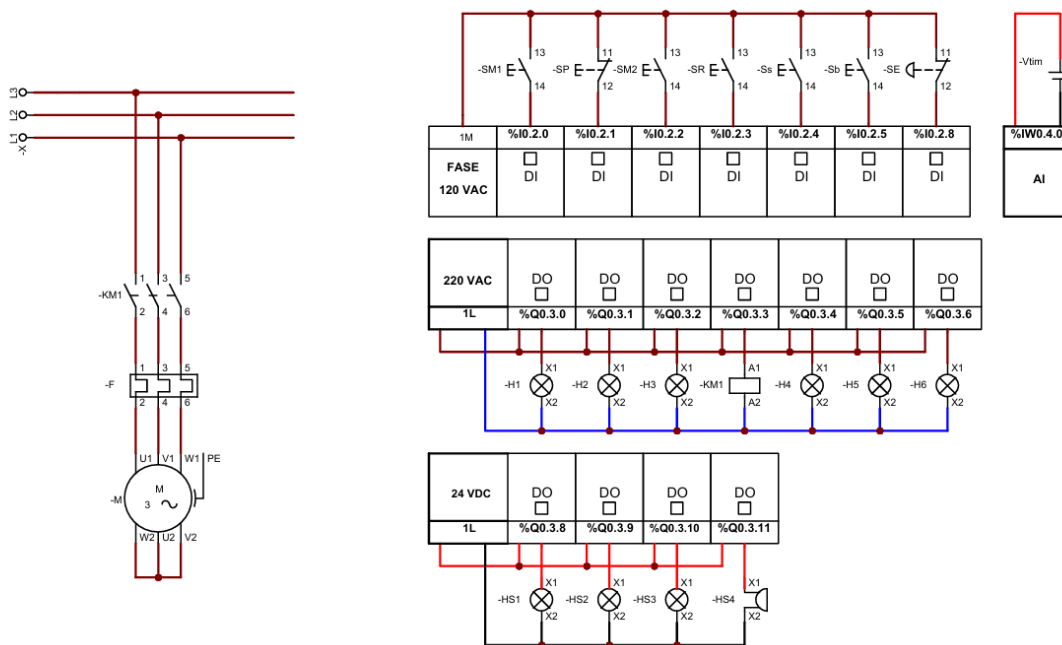


Fig. 1 Diagrama de conexionado del PLC con elementos físicos

Para que la planta funcione, lo primero que se debe realizar las siguientes configuraciones en la pantalla "Controladores" de la interfaz gráfica que se muestra en la Figura 2:

- ii) En (A) se cambia el setpoint
- iii) Con (B) Se selecciona el tipo de controlador con el que se quiere trabajar: PID convencional o PID difuso adaptativo o no adaptativo, con funciones de pertenencia triangulares o gaussianas y, si es necesario, con (C) o (D) se puede realizar el ajuste de sus parámetros.
- iv) En (E) se puede observar los índices de desempeño ISE e IAE
- v) En (F) se puede navegar a la otra pantalla en donde se encuentra la animación del proceso.
- vi) En (G) se puede observar el comportamiento del controlador escogido.
- vii) En (H) se puede observar el comportamiento de la señal de control.

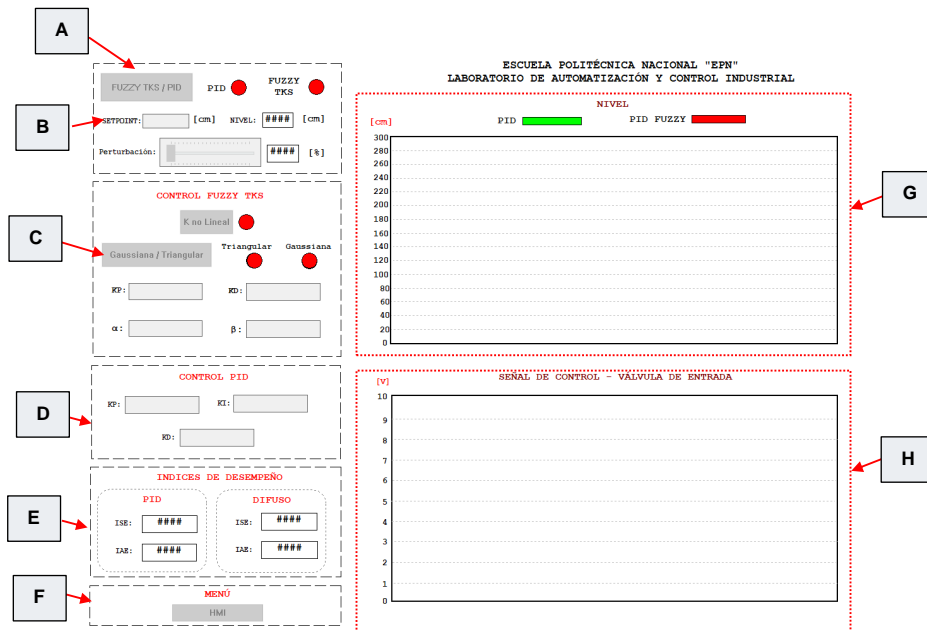


Fig. 2 Pantalla de configuración de los controladores

Modo Local:

A lado derecho del tanque de nivel se encuentra uno de los tablero de control virtual, en este se tiene el selector de modo PS. En modo Local, el proceso solo se puede controlar mediante el tablero del Factory I/O o el tablero físico. Si el selector se encuentra como en la Figura 3 entonces está en modo local.

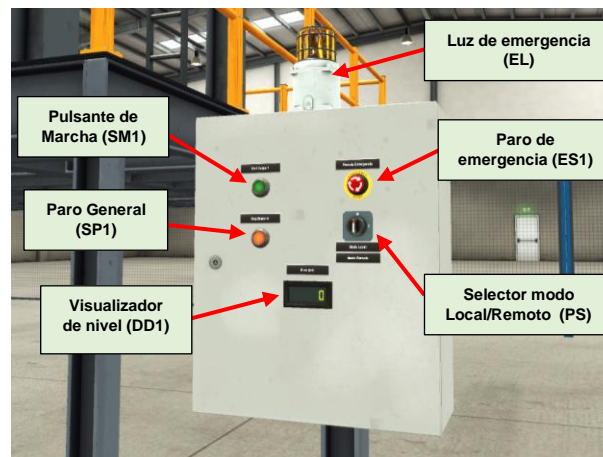


Fig. 3 Primer tablero de control en Factory I/O

i) Seleccionado el modo Local, para que se llene el tanque se tiene que pulsar el botón de marcha SM1, la válvula de entrada V1 se abrirá hasta que el nivel llegue a la referencia deseada, además de que el nivel se muestra en todo momento en el display DD1 del tablero de control.

ii) Una vez que el nivel ha llegado a la referencia deseada es posible seguir con el subproceso que cuenta de 3 etapas: Llenado, tapado y etiquetado de botellas.

Enfrente de la banda transportadora se encuentra el segundo tablero de control, que se muestra en la Figura 4.

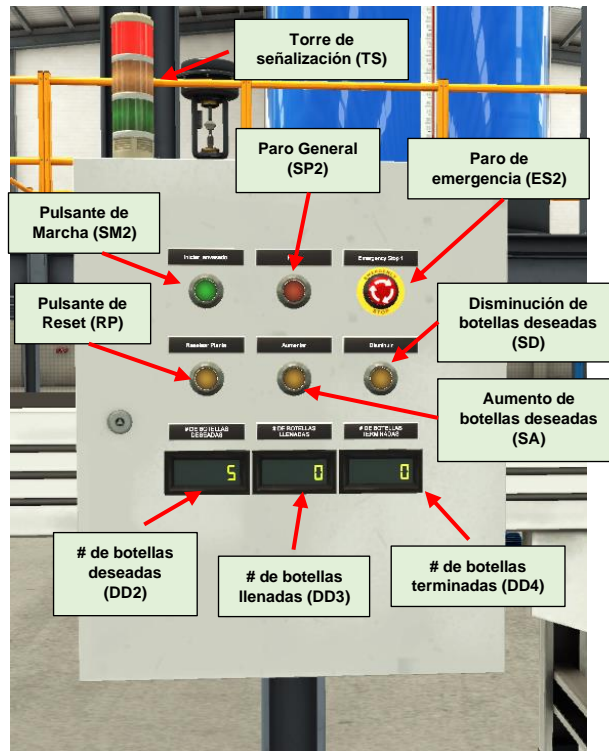


Fig. 4 Segundo tablero de control en Factory I/O

iii) En este tablero se puede configurar el número de botellas, aumentando o disminuyendo su cantidad mediante los pulsadores SA y SD respectivamente, mientras el número de botellas deseadas se puede observar en el display DD2. El número de botellas deseadas es modificable solo cuando el proceso de llenado, tapado y etiquetado no este ejecutándose.

iv) El tiempo de llenado es configurado mediante el potenciómetro del PLC M580.

v) Una vez establecido el número de botellas deseadas, para que comience el proceso de llenado, tapado y etiquetado se debe pulsar SM2.

vi) En el display DD3 se van a observar el número de botellas que son llenadas.

vii) En el display DD4 se van a observar el número de botellas que han sido tapadas y etiquetadas.

viii) Una vez completado el llenado, tapado y etiquetado de todas las botellas deseadas, tanto físicamente como en la torre de señalización se encenderá la luz roja y la luz verde.

Modo Remoto:

En este modo solo se puede controlar el proceso mediante la pantalla llamada “HMI” que se muestra en la Figura 5.

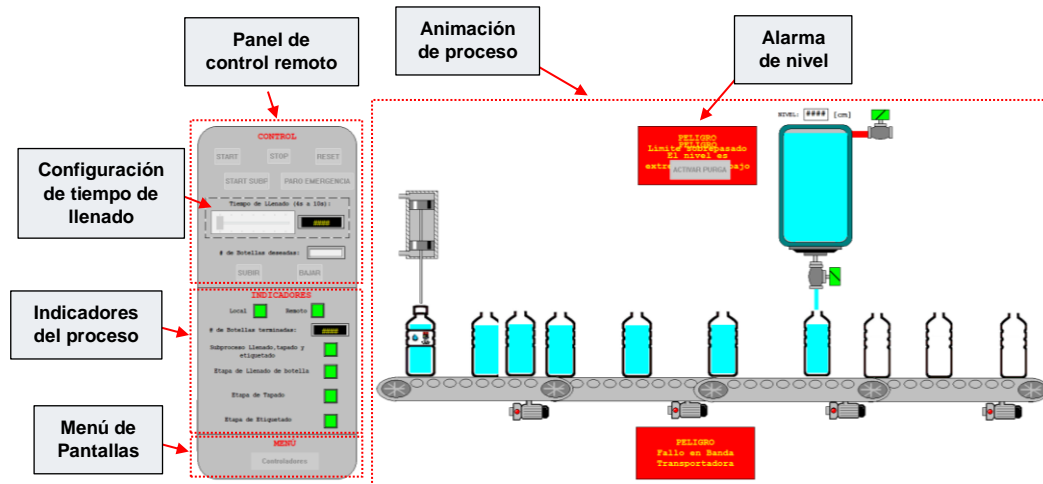


Fig. 5 Pantalla de animación del proceso

- i) Para que empiece el llenado del tanque se debe pulsar el botón “START”
- ii) El tiempo de llenado se cambia con el slider.
- iii) Se tiene que pulsar el botón “START SUBP” para que inicie el subproceso.
- iv) Se aumenta el número de botella deseadas con el botón “SUBIR” y se las disminuye con el botón “BAJAR”. El número de botellas deseadas es modificable solo cuando el proceso de llenado, tapado y etiquetado no este ejecutándose.
- v) Con el botón “Controladores” se abre la otra pantalla del HMI.

Otras Funcionalidades:

- *Paro*: En el tablero físico se tiene un botón de paro, en los tableros virtuales se tiene los pulsadores SP1 y SP2, mientras que en el HMI se tiene el botón “STOP”. Todos estos elementos tienen la funcionalidad de realizar un paro general del proceso. Este paro detiene todo el proceso en cualquier etapa en la que se encuentre. Para reanudar, si se está en la etapa de llenado del tanque se debe pulsar el botón SM1 si es mando local o “START” si es mando remoto. Mientras que si se está en alguna etapa del subproceso se

debe pulsar el botón SM1 y SM2 si es mando local o "START" y "START SUBP" si es mando remoto.

- *Paro de emergencia y reset:* En el tablero físico, se dispone de un interruptor, mientras que en los tableros virtuales se encuentran los pulsadores tipo hongo ES1 y ES2, mientras que en el HMI está el botón "PARO DE EMERGENCIA". El paro de emergencia detiene en cualquier parte el proceso, y es necesario resetear la planta para volver a condiciones iniciales. Para esto se desenchava el paro de emergencia, y se pulsa el botón RP si se está en modo local o se pulsa el botón "RESET" si se está en modo remoto. Al pulsar este botón, el tanque se vacía completamente y las botellas presentes en la banda transportadora se desechan a otra banda transportadora con ayuda del cilindro neumático CN3.

- *Fallo de nivel:* Este fallo se presenta cuando el nivel del tanque está sobre o por debajo del 20% de la referencia. Este fallo hace que se detenga el subproceso, pero permite que se complete la etapa en la que se encuentra. Para reanudar el proceso, si el nivel está sobrepasado, se debe pulsar un botón que se muestra en la alarma de nivel visual en el HMI, para vaciar el exceso de líquido. Si hay un nivel insuficiente, se debe arreglar la válvula de entrada para que el nivel alcance la referencia. Luego, se debe pulsar el botón SM1 y SM2 si es mando local, o "START" y "START SUBP" si es mando remoto.

ANEXO II. Hoja Guía para el Laboratorio LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN CON PLC's

PRÁCTICA N°X

1. TEMA

Controlador PID de nivel implementado en Factory I/O

2. OBJETIVOS

- 2.1. Implementar un controlador PID de nivel en un tanque utilizando el software Factory I/O y el PLC Modicon M580.
- 2.2. Diseñar un subproceso de llenado, tapado y etiquetado de botellas utilizando los componentes disponibles en el software Factory I/O e implementar su control mediante el PLC Modicon M580.
- 2.3. Realizar un mando Local/Remoto para el funcionamiento de toda la planta diseñada.
- 2.4. Diseñar una interfaz gráfica en el software Control Expert Classic para visualizar las gráficas del funcionamiento del controlador y la señal de control.

3. MARCO TEÓRICO

El controlador PID es uno de los más utilizados en procesos industriales y ha sido extensamente estudiado a lo largo del tiempo, disponiendo de métodos de sintonización mediante ecuaciones o métodos heurísticos. En la Figura 1 se puede observar un controlador PID, el funcionamiento del controlador depende del error. En contexto del control de nivel en un tanque, el error se calcula restando la consigna o referencia del nivel con el valor medido por un sensor analógico. Este controlador está compuesto por las partes proporcional (P), integral (I) y derivativa (D).

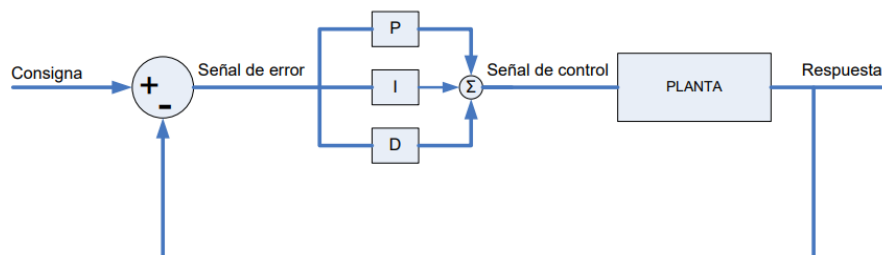


Fig. 1 Esquema de controlador PID

La ecuación que representa este controlador es:

$$u(t) = P + I + D = \left(k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Se sintonizan las ganancias k_p , k_i y k_d para mejorar la respuesta del sistema. La constante proporcional k_p mejora el error actual del controlador; sin embargo, si es demasiado alta, puede causar oscilaciones, y si es demasiado baja, ralentiza la respuesta del sistema. La constante integral k_i elimina el error acumulado a lo largo del tiempo, lo que permite al sistema alcanzar la referencia si la parte proporcional no puede. Pero, si k_i es demasiado alta, el tiempo de estabilización puede aumentar. Por último, la constante derivativa k_d anticipa el error futuro, mejorando la estabilidad del sistema. Sin embargo, si k_d es muy alta, el sistema se vuelve demasiado sensible lo que puede dañar el actuador debido a las fluctuaciones.

4. TRABAJO PREPARATORIO

- 4.1. Realizar una revisión bibliográfica sobre controladores PID
- 4.2. Investigar las aplicaciones industriales del controlador PID
- 4.3. Realizar un programa en Factory I/O utilizando el tanque de la Figura 2, y configurarlo como analógico.
- 4.4. Programa la lógica del controlador PID en el software Control Expert, donde el nivel es medido por el sensor LS, y la señal de control es aplicada a la válvula de entrada V1.

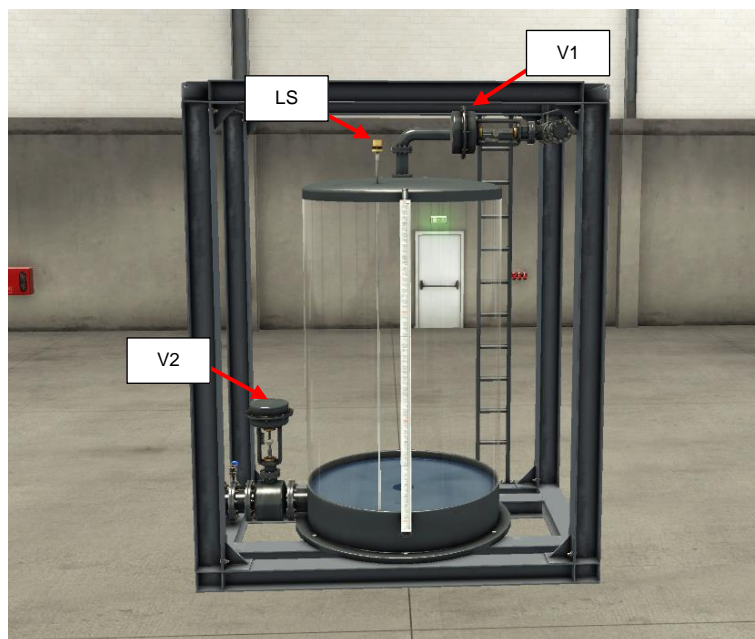


Fig. 2 Tanque de Factory I/O

- 4.5. Diseñar un tablero de control en Factory I/O para controlar el proceso de llenado del tanque. El diseño incluye un pulsante de marcha (SM1) para iniciar el llenado, un pulsante de paro (SP1) detiene el proceso, un selector (SL1) para realizar el modo Local/Remoto, y un display digital (DD1) para mostrar el nivel actual del tanque, como se ilustra en la Figura 3.

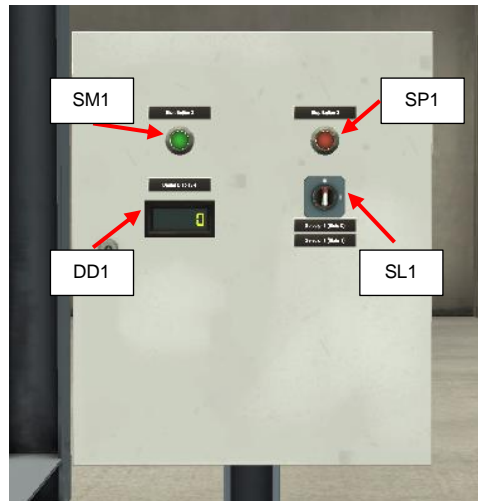


Fig. 3 Tablero de control para llenado del tanque

- 4.6. Implementar la lógica de control en Control Expert utilizando los elementos del tablero diseñado.
- 4.7. Diseñar una interfaz gráfica (HMI) en Control Expert, donde se permita la visualización de las gráficas del comportamiento del controlador y de su señal de control.
- 4.8. Traer el programa en una memoria USB para validar su funcionamiento en el Laboratorio.

5. EQUIPO Y MATERIALES

- PLC Modicon M580
- Software Factory I/O
- Tablero de control disponible en el laboratorio.

6. PROCEDIMIENTO

- 6.1. Validar el funcionamiento del controlador PID de nivel.
- 6.2. Diseñar un tablero de control para la etapa de llenado como el que se puede observar en la Figura 4. Considerando que:

- El pulsante de marcha SM2 inicia el proceso de llenado de botellas.
- El pulsante de paro SP2 detiene tanto el llenado del tanque como el llenado de botellas. Configurar el pulsante SP1 para que también detenga todo el proceso.
- El pulsante SA aumenta el número de botellas deseadas.
- El pulsante SB disminuye el número de botellas deseadas.
- En el display DD2 se muestra el número de botellas deseadas.
- En el display DD3 se muestra el número de botellas llenadas.

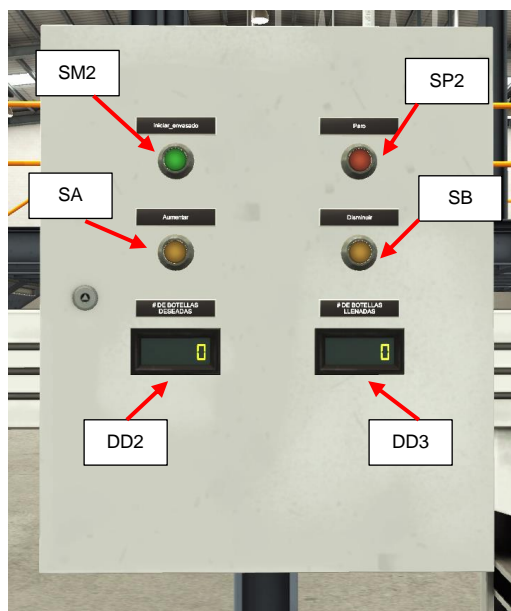


Fig. 4 Tablero de control para llenado de botellas

6.3. Diseñar una etapa de llenado de botellas en Factory I/O como la que se observar en la Figura 5.

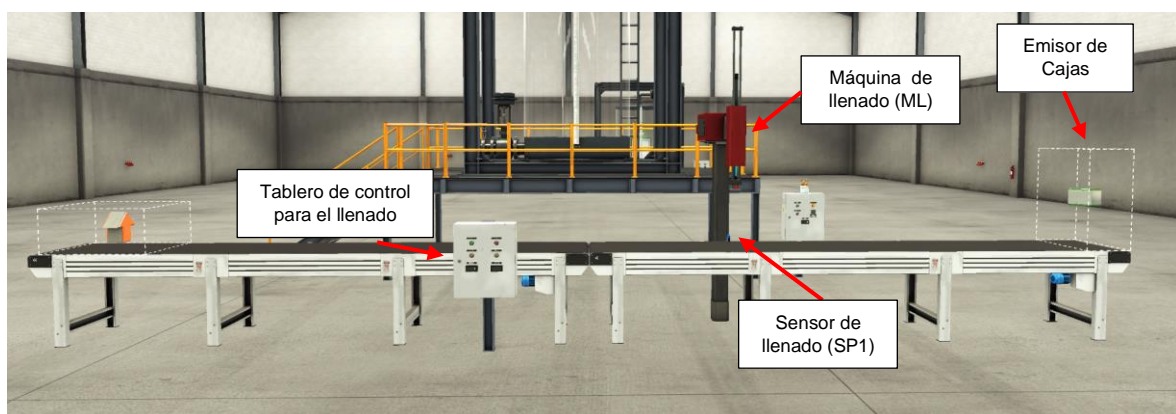


Fig. 5 Etapa de llenado de botellas en Factory I/O

6.4. Implementar la programación de la etapa de llenado añadiendo lo explicado en la sección 6.2 , y considerando que:

- El nivel del tanque debe haber alcanzado la referencia deseada para iniciar el llenado de botellas.
- El proceso de llenado inicia pulsando SM2, activando la banda transportadora.
- El tiempo de llenado es configurado mediante un SLIDER agregado en el HMI.
- El sensor SP1 detecta la botella y detiene la banda transportadora. Simultáneamente, el equipo "Two-Axis Pick & Place" que simula la máquina de llenado ML baja su brazo y la válvula de salida V2 se abre. Esto se realiza durante un tiempo de llenado configurado.
- Pasado el tiempo de llenado, la maquina ML vuelve a su posición inicial y la válvula V2 se cierra.
- Si se pulsa SP1 o SP2 se para todo la planta. Para iniciar nuevamente el proceso se debe pulsar los botones de marcha SM1 y luego SM2. Si se para el proceso al momento del llenado de una botella, cuando se inicia nuevamente se debe completarse el llenado con el tiempo restante.

6.5. Se conectan al PLC elementos físicos como luces piloto, pulsadores y el motor de inducción trifásico, para poder realizar el control local de la planta mediante el tablero virtual y el tablero físico.

6.6. Realizar un mando Remoto mediante HMI.

7. INFORME

7.1. Añadir a la planta una etapa de sellado y etiquetado de botellas. Simular tanto el llenado como el etiquetado con cilindros neumáticos disponibles en el software Factory I/O.

7.2. Implementar la programación para la etapa de sellado y etiquetado incluye la función de paro y la adición de elementos visuales que indican la fase respectiva del proceso.

Presentar:

- Explicación de lógica de control del controlador PID y de los elementos que componen la Interfaz gráfica.

- Diagrama de fuerza y esquema de conexión de E/S del PLC M580.
- Programa en una memoria USB para validar su funcionamiento en el Laboratorio.

7.3. Conclusiones individuales.

7.4. Bibliografía.

8. REFERENCIAS

- Apuntes de clase.
- Automatismos Industriales, Julián Rodríguez-Luis Cerdá
-

Elaborado por: José Andrés Jumbo

Revisado por: PhD. Luis Morales E.

Coordinador de la asignatura de Control Industrial

ANEXO III. Datasheet Torre de Visualización 24VDC



ST45L Ø45mm Pole mount, LED Steady/Flashing

Model number	Layers	Voltage	Certificates	Weight	Color
ST45L	1	AC/DC12V	CE UL	0.35kg	● R-Red
Steady		AC/DC24V		0.35kg	
ST45L-BZ		AC110V		0.45kg	
ST45L-WM		AC220V		0.45kg	
Steady w/built-in buzzer	2	AC/DC12V	CE UL	0.39kg	● R-Red ● G-Green
ST45L-WS		AC/DC24V		0.39kg	
ST45L-WM		AC110V		0.49kg	
ST45L-WA		AC220V		0.49kg	
Steady/5 Alarms	3	AC/DC12V	CE UL	0.44kg	● R-Red ● A-Amber ● G-Green
ST45LF		AC/DC24V		0.44kg	
Steady/Flashing		AC110V		0.54kg	
ST45LF-BZ		AC220V		0.54kg	
Steady/Flashing w/built-in buzzer	4	AC/DC12V	CE UL	0.48kg	● R-Red ● A-Amber ● G-Green ● B-Blue
ST45LF-WS		AC/DC24V		0.48kg	
ST45LF-WM		AC110V		0.58kg	
ST45LF-WA		AC220V		0.58kg	
Steady/Flashing/5 Alarms	5	AC/DC12V	CE UL	0.52kg	● R-Red ● A-Amber ● G-Green ● B-Blue ○ W-White
ST45LF		AC/DC24V		0.52kg	
Steady/Flashing/5		AC110V		0.62kg	
ST45LF-WA		AC220V		0.62kg	

※ CE Compliant: DC12V, DC24V, UL Listed: DC24V(Except sound types)



ST45L Series

Light source/buzzer current(based on 1 layer)

Voltage	AC/DC12V	AC/DC24V	AC110V	AC220V
Light source current(1 layer)	40mA	55mA	45mA	30mA
Buzzer current	40mA	75mA	50mA	35mA
Signal sound current	200mA(DC12V)	135mA(DC24V)	50mA	35mA

Built-in buzzer output holes formed on the housing of the product



Mounting bracket

Standard	LB18	LW18	QZ18	SZ18	QL18	SL18
Steel	Steel	ABS	ABS	Al	ABS	Al

※ Please refer to [Tower Light Mounting bracket] on this catalogue for detailed dimensions

Ordering Specifications

ST45L	3	24	RAG	LW18
[Model number]	[Layers]	[Voltage]	[Color]	[Bracket]
ST45L	1-1 Layers	12-DC12V	● R-Red	None-Standard
ST45L-BZ	2-2 Layers	24-DC24V	● A-Amber	Bracket
ST45L-WS	3-3 Layers	110-AC110V	● G-Green	-LB18 -LW18
ST45L-WM	4-4 Layers	220-AC220V	● B-Blue	-QZ18 -SZ18
ST45L-WA	5-5 Layers		○ W-White	-QL18 -SL18
ST45LF				
ST45LF-BZ				
ST45LF-WS				
ST45LF-WM				
ST45LF-WA				

Customization

- 2 buzzer sound types : Both prolonged (beep, beep) and staccato (beep, beep, beep)buzzer output available
- AC type each layer power provided(same wiring DC steady)
- DC24V voltage UL listed product
- Customized pole length available

LED Steady/Flashing Tower Lights

ST45L / ST56L / ST80L Series

Wiring Instructions

- In case of wiring with External Contacts, refer to the wiring diagrams below according to your product's type and voltage setting.
- Customized AC each layer power supply type wiring is same as DC steady type.

Wiring Instructions		Wiring Instructions	
DC Steady		AC Steady	
<p>ST45ML ST45L ST56MEL ST56ML ST56EL ST56L ST80MEL ST80ML ST80EL ST80L</p>		<p>ST45ML ST45L ST56MEL ST56ML ST56EL ST56L ST80MEL ST80ML ST80EL ST80L</p>	
<p>DC Steady/ Flashing</p> <p>ST45MLF ST45LF ST56MELF ST56MLF ST56ELF ST56LF ST80MELF ST80MLF ST80ELF ST80LF</p>		<p>AC Steady/ Flashing</p> <p>ST45MLF ST45LF ST56MELF ST56MLF ST56ELF ST56LF ST80MELF ST80MLF ST80ELF ST80LF</p>	
<p>DC/AC Steady Built-in Signal Sound</p> <p>ST45ML ST45L ST56MEL ST56ML ST56EL ST56L ST80MEL ST80ML ST80EL ST80L</p> <p>· ST□□M(E)L - WS/WM/WA same wiring instruction · ST□□(E)L - WS/WM/WA same wiring instruction · ST□□L └─ Lens diameter 45(45mm): ST45L 56(56mm): ST56L 80(80mm): ST80L</p>		<p>DC/AC Steady/ Flashing Built-in Signal Sound</p> <p>ST45MLF ST45LF ST56MELF ST56MLF ST56ELF ST56LF ST80MELF ST80MLF ST80ELF ST80LF</p> <p>· ST□□M(E)LF - WS/WM/WA same wiring instruction · ST□□(E)LF - WS/WM/WA same wiring instruction · ST□□LF └─ Lens diameter 45(45mm): ST45LF 56(56mm): ST56LF 80(80mm): ST80LF</p>	

- DC steady type cable specification: External power line/External signal line UL1007 AWG22(0.3sq) 400mm
- AC steady, AC/DC steady/flashing type cable specification: External power line UL1015 AWG18(0.75sq) x 2C 400mm
External signal line UL1007 AWG22(0.3sq) 400mm

ANEXO IV. Programación de Funciones de membresía

Tipo triangular:

ERROR_FUZZY

```
1|      1|      10|      20|      30|      40|      50|      60|      70|      80|      90|      100|      110|
1  i:=0;
2
3  FUZZY_ERR[0]:=0.0;
FUZZY_ERR[1]:=0.0;
FUZZY_ERR[2]:=0.0;
FUZZY_ERR[3]:=0.0;
7  FUZZY_ERR[4]:=0.0;
8
9  (*Primera funcion de membresia*)
10 a:= -1.0; 11      b:= -0.5;
12      (*Segunda funcion de membresia*)
13      c:= -1.0;
14      d:= -0.5;
15      e:= 0.0;
16
17      (*Tercera funcion de membresia*)
18      f:= -0.5;
19      g:= 0.0; 20      h:= 0.5;
21      (*Cuarta funcion de membresia*)
22      o:= 0.0; 23      p:= 0.5; 24      q:= 1.0;
25      (*Quinta funcion de membresia*)
26      r:= 0.5;
27      s:= 1.0;
28      29
30 FOR i := 0 TO 4 DO
      CASE i OF 32
33
34          IF err <= a THEN
FUZZY_ERR[i] := 1.0;
35          ELIF err > a AND err < b THEN
FUZZY_ERR[i] := (b - err) / (b - a);
36          END_IF; 38
1:
39          IF err >= c AND err < d THEN
FUZZY_ERR[i] := (err - c) / (d - c);
40          ELIF err >= d AND err < e THEN
FUZZY_ERR[i] := (e - err) / (e - d);
41          END_IF; 44
2:
42          IF err >= f AND err < g THEN
FUZZY_ERR[i] := (err - f) / (g - f);
43          ELIF err >= g AND err < h THEN
FUZZY_ERR[i] := (h - err) / (h - g);
44          END_IF; 50
3:
45          IF err >= o AND err < p THEN
FUZZY_ERR[i] := (err - o) / (p - o);
46          ELIF err >= p AND err < q THEN
FUZZY_ERR[i] := (q - err) / (q - p);
47          END_IF; 56
4:
48          IF err >= r AND err < s THEN
FUZZY_ERR[i] := (err - r) / (s - r);
49          ELIF err >= s THEN
FUZZY_ERR[i] := 1.0;
50          END_IF;
51
52      END_CASE;
53 END_FOR;
```

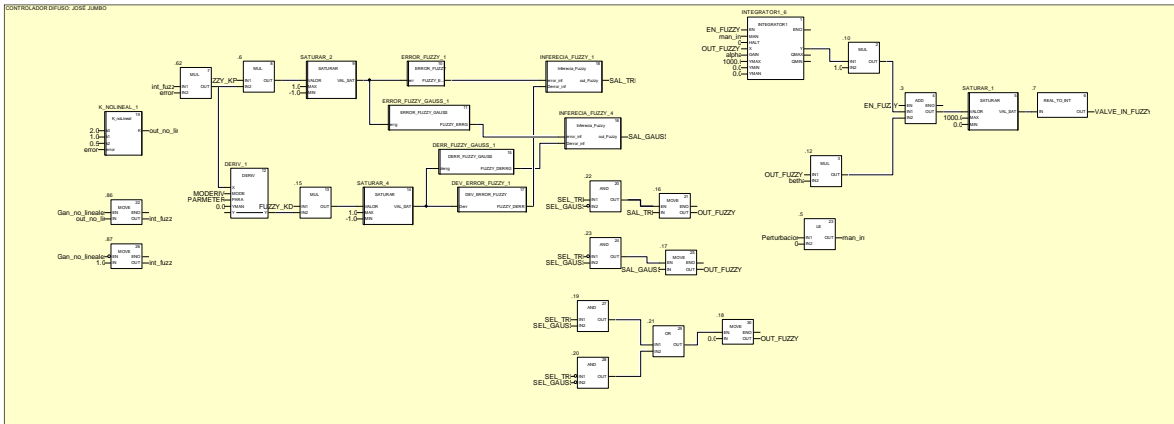
Tipo gaussianas:

ERROR_FUZZY_GAUSS

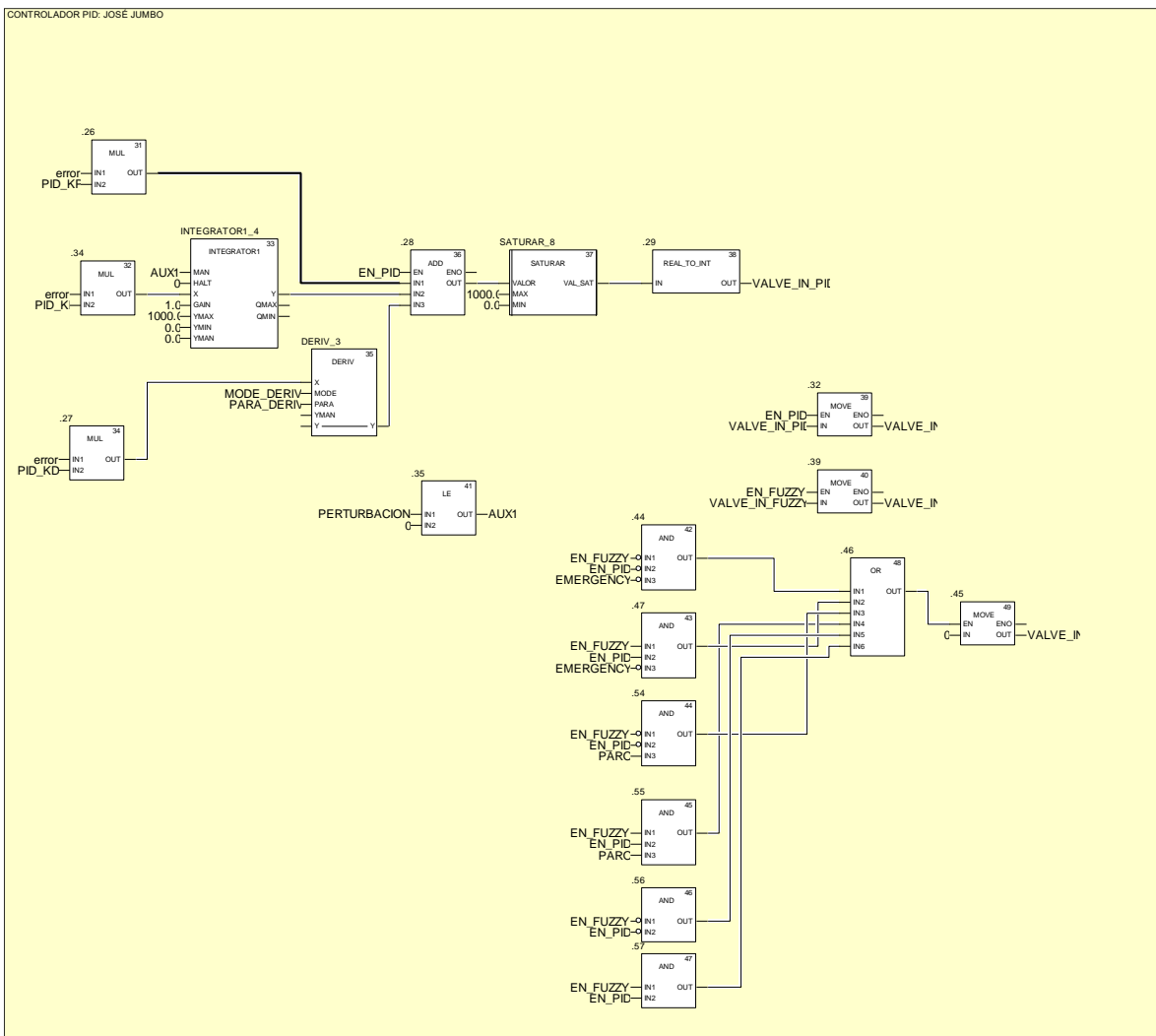
```
1|      1|      10|      20|      30|      40|      50|      60|      70|      80|      90|      100|      110|
1  sigm:=0.15;
2  mu[0]:=-1.0;
3  mu[1]:=-0.5;
4  mu[2]:=0.0;
5  mu[3]:=0.5;
6  mu[4]:=1.0;
7
8  FOR i := 0 TO 4 DO
9  FUZZY_ERRG[i] := EXP(-(((errg- mu[i])*(errg- mu[i])) / (2.0 * ((sigm*sigm)))));
10 END_FOR;
```


ANEXO V. Programación de controladores

Controlador PID Difuso:



Controlador PID:



ANEXO VI. Video demostrativo

En el siguiente enlace, se mostrará un video que ilustra el módulo didáctico virtual implementado y su funcionamiento:

[TIC VIDEO JUMBO JOSE.mp4](#)

CÓDIGO QR:

