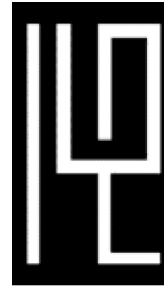




UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA MECANICA



Autor del proyecto

Apellidos: Deantonio Lamprea
Nombres: Jennifer Carolina
Código: 065121040
Cédula: 1026291344
Teléfono de contacto: 3046262711
Correo institucional: Jenniferc.deantoniol@unilibrebog.edu.co



Título del proyecto

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL PARA
TANQUES ACOPLADOS DE ALMACENAMIENTO DE HIPOCLORITO**

Director del proyecto

Nombres: Edilberto Carlos
Apellidos: Vivas González
Profesión: Ingeniero Electrónico **Oficina:** L-204
Correo Institucional: edilbertoc.vivasg@unilibrebog.edu.co

Revisión						
Fecha						

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE
NIVEL PARA TANQUES ACOPLADOS DE ALMACENAMIENTO DE
HIPOCLORITO**

Jennifer Carolina Deantonio Lamprea

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2019**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE
NIVEL PARA TANQUES ACOPLADOS DE ALMACENAMIENTO DE
HIPOCLORITO**

Jennifer Carolina Deantonio Lamprea

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniera Mecánica**

Director
Edilberto Carlos Vivas Gonzalez
Msc, Automatización Industrial, Ing. Electrónico

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2019

Dedicatoria
Para mi familia, novio,
amigos e ingenieros
que me apoyaron a lo
largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Lucia Lamprea y Flavio De Antonio y hermana Laura De Antonio por su amor y apoyo constante durante este proceso y darme la oportunidad de emprender en esta carrera. A mi tío Luis Angel Lamprea y Sandra Dufai Perez por sus consejos y ayuda en cada obstáculo presentado. A mi novio Mauricio Spitta por su paciencia y cariño en cada fase de este proyecto.

A mi director Ingeniero Carlos Vivas por su paciencia y colaboración. A la Universidad Libre y los ingenieros del departamento de Ingeniería Mecánica por su conocimiento, apoyo, amistad. Al Ingeniero Mauricio Peña por su colaboración y asesoría.

Al Ing. Wilson Suarez, Nelson Gonzalez y Oscar Rojas por su apoyo en la elaboración del proyecto en la planta. A la empresa por brindarme la oportunidad de colaborar en la mejora de sus procesos. A Ronald y Erika por su conocimiento y enseñanza.

Gracias.

RESUMEN

En la mejora de procesos industriales, es requerido disminuir tiempos de producción para que las empresas sean más competitivas. En la planta de producción se desarrolló el sistema de control, un operario supervisaba y controlaba el nivel de líquido de los tanques de almacenamiento de forma manual, por lo tanto, tenía un porcentaje alto de riesgo de sobrepasar los niveles y producir pérdidas económicas para la empresa.

En este trabajo, se desarrolla el modelado del sistema actual con las condiciones de operación de la planta y se compara con los datos experimentales. Además se implementó el sistema de adquisición de datos, conexión de actuadores y sensores, además del diseño del algoritmo de control secuencial implementado en un controlador lógico programado, para realizar la supervisión y control del nivel de los tanques de almacenamiento de hipoclorito. Se describe la planta, la instalación de la instrumentación, el diseño de la interfaz gráfica y la programación del algoritmo de control en el PLC (Controlador Lógico Programable). Se obtiene una aproximación del modelo matemático respecto los datos experimentales siendo 0.43 % para el tanque 1 y 0.86 % para el tanque 2. FALTA PONER INGLESSSSSSSSS

Palabras claves: CX Programmer, Control ON-OFF con histéresis, NB-Designer, Modelado del sistema, Tanques acoplados.

ABSTRACT

In the improvement of industrial processes, it is required to reduce production times for companies to be more competitive. In the clean product's industry which was developed the control system, an operator supervised and controlled the liquid level of the storage tanks manually, therefore, had a high percentage of risk of exceeding the levels and produce economic losses for the company.

In this work, the system of data acquisition, connection of actuators and sensors was implemented, as well as the design of the sequential control algorithm implemented in a programmer logic controller, to perform the monitoring and control of the level of the hypochlorite storage tanks.

It describes the plant, the installation of the instrumentation, the design of the graphic interface and the programming of the control algorithm in the PLC (Programmable Logic Controller). The practical results obtained from the performance of the level control system of the coupled tank plant are shown.

Key words: CX Programmer, ON-OFF control with hysteresis, NB-Designer, System modeling, Coupled tanks.

CONTENIDO

	pág.
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO REFERENCIAL	17
2.1. ESTADO DEL ARTE	17
2.2. MARCO TEÓRICO	19
2.3. MARCO CONCEPTUAL	24
3. DESCRIPCION DEL SISTEMA	28
4. DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR	38
5. MODELADO DE LA PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS . . .	47
6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	51
7. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL	61
8. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	86
9. CONCLUSIONES	91
10. TRABAJOS FUTUROS	92
11. BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1. Control secuencial en un sistema de nivel	19
2. Sistema de control en lazo cerrado con realimentación	20
3. Proceso de control en lazo cerrado	21
4. Diagrama de funcionamiento del Controlador ON-OFF	22
5. Diagrama de funcionamiento del Controlador ON-OFF con histéresis	23
6. Sistema de tanques de almacenamiento	28
7. Tablero de control	30
8. Esquema del tablero de control	31
9. Instrumentación instalada en el tablero de control	31
10. Componentes tablero de control	32
11. Componentes tablero de control	32
12. Instalación de tubing eléctrico y soportes	33
13. Nomenclatura de las señales E/S del PLC	33
14. Sensor de presión con celda cerámica	34
15. Sensor de presión-Display de configuración	35
16. Instalación del sensor en los tanques	36
17. Válvula de bola de accionamiento neumático	37
18. Sensor de presión con celda cerámica	37
19. PLC Omron CP1LEM30DT	38
20. Componentes PLC	39
21. E/S digitales del PLC	40
22. CX-Programmer de OMRON	41
23. Tipos de lenguajes gráficos de programación de PLC	41
24. Módulo de entradas analógicas	42
25. Módulo de entrada analógica conectado a PLC por medio de adaptador.	42
26. Modo de conexión de dispositivo en el módulo analógico	43
27. Señal que recibe el módulo al conectar una señal de 4 a 20 mA	44
28. Human-Machine Interface OMRON	45

29. Software de programación HMI NB-DESIGNER	45
30. Conexión Ethernet para la comunicación PLC-HMI	46
31. Diagrama del sistema de tanques	47
32. Diagrama de la conexión entre tanques	49
33. Conversión de corriente del sensor a palabra de resolución (WORD)	51
34. Especificación de resolución de un CP1W-AD041	52
35. Umbrales de histéresis de la señal recibida del sensor en bits de resolución	53
36. Sistema de tanques en carga	54
37. Sistema de tanques en carga	55
38. Caso 2: Válvulas de entrada y salidas abiertas	56
39. Datos Experimentales en condiciones de caso mostrado	58
40. Comparación de modelo vs datos experimentales en tanque 1 y 2	59
41. Diagramas de bloques del sistema. Secuencia del control	61
42. Diagrama de estados del control del sistema	63
43. Estructura general del PLC	64
44. Pulsadores e interruptores del tablero de control	65
45. Sección de programa: Activar	66
46. Configuración asignada para los parámetros requeridos	66
47. Direcciones para asignar parámetros al PLC	67
48. Parámetros asignados en las direcciones de bit	67
49. Sección de programa: Configuración	67
50. Sección de programa: Temporizadores	68
51. Sección de programa: Comparador	70
52. Prueba de nivel bajo: Comparador en tanque 1	70
53. Prueba de nivel en rango: Comparador en tanque 1	71
54. Prueba de nivel alto: Comparador en tanque 1	71
55. Sección de programa: Escalado	72
56. Sección de programa: Reset	73
57. Visualizador Numérico - HMI	74
58. Dirección de lectura Visualizador Numérico - HMI	75
59. Definir decimales del dato recibido - HMI	75

60. Diagrama lógico del control automático	76
61. Diagrama ladder Modo control automático	76
62. Comportamiento del nivel de líquido en el tanque con el control	77
63. Diagrama lógico del control manual	78
64. Direcciones asignadas desde la pantalla	78
65. Sección de programa: Control - Manual	79
66. Diagrama lógico de activación de válvulas	79
67. Sección de programa: Control válvulas	80
68. Sección de programa: Salida a válvulas	80
69. Sección de programa: Salidas a HMI	81
70. Indicador de nivel - Pantalla HMI	81
71. Selección de PLC y configuración de comunicación	82
72. Panel de configuración IP para PLC OMRON	82
73. Selección de pantalla para configuración	83
74. Panel de configuración IP en HMI OMRON	83
75. Configuración de IP de dispositivos en HMI	84
76. Estado del Ethernet conectado	84
77. Panel de configuraciones de la red Ethernet en computador.	85
78. Panel de configuración IP para computador	85
79. Pantalla Inicial HMI	86
80. Pantalla del tanque 1 con accionables	87
81. Asignación variable de lectura	88
82. Configuración alarma de color en barra de nivel	89
83. Configuración de escritura	89

LISTA DE TABLAS

	pág.
1. Lista de instrumentos instalados en la planta	29
2. Variables enviadas al HMI	74
3. Lista de objetos utilizado en el desarrollo de la pantalla HMI del tanque 1	90

SIMBOLOGÍA

LETRAS LATINAS

- V = voltaje
- A = amperios
- m = metros
- cm = centímetros
- mm = milímetros
- kg = kilogramos
- s = segundos
- min = minutos

LETRAS GRIEGAS

- ρ = densidad
- π = número pi = 3.1416
- Σ = sumatoria
- δ = diferencia

ACRÓNIMOS

- PLC = controlador lógico programable
- HMI = interfaz humano-máquina
- PID = proporcional, integral y derivativo
- IP = protocolo internet

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se trata sobre el diseño e implementación de un sistema de control en los tanques de almacenamiento de hipoclorito de la planta, ofreciendo un procedimiento del modelado del sistema de nivel, simulación de la planta actual, programación del controlador autómatas, y los detalles de la implementación en planta, partiendo de la instalación de instrumentación necesaria, luego con el diseño del tablero de distribución y por último las pruebas del sistema de control en la planta.

Los tanques permiten almacenar hipoclorito para la posterior distribución; sin la supervisión constante de un operario que realice la apertura o cierre de válvulas de los diferentes tanques, el hipoclorito almacenado puede sobrepasar el nivel del tanque, y producir pérdidas económicas para la planta y riesgo para la salud del personal.

Se desarrolló el diseño e implementación de un sistema de supervisión y control *ON – OFF* con histéresis en los tanques de almacenamiento de hipoclorito, se evaluó teniendo en cuenta el control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), debido a los costos generados de la válvula proporcional sobre la válvula *ON – OFF*. Aunque estudios como ingeniería detallada, modelado y simulación de un sistema de tanques interactuantes no lineales, desarrollado en la Universidad Javeriana", demuestra que el control PID es eficiente, para el control de tanques acoplados. Es importante recalcar el costo de implementación del control PID respecto al control *ON – OFF*.

En el primer capítulo se presenta el problema y objeto de investigación, justificación y los objetivos del proyecto.

El capítulo dos abarca los conceptos básicos para la lectura del documento.

En el capítulo tres y cuatro, se describe la planta, el controlador y la instrumentación.

En el capítulo cinco y seis, se realiza el modelado de la planta y caracterización de los componentes, aplicando las leyes físicas que rigen el sistema.

En el capítulo siete presenta y explica la programación de control, cargada al autómata programable.

En el capítulo ocho, se presenta la visualización implementada en la pantalla HMI (Interfaz Humano - Máquina).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control de nivel en tanques acoplados de almacenamiento de hipoclorito.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el modelo matemático del sistema de forma analítica o usar técnicas de identificación de sistemas tomando datos a través de un sensor de presión diferencial.
- Simular la dinámica del sistema de llenado y vaciado.
- Diseñar la ley de control utilizando un control ON-OFF con histéresis.
- Implementar el sistema de control de nivel con el sensor de presión diferencial y visualización del nivel en una pantalla Interfaz Humano-Máquina.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se muestran algunas referencias, que permiten reconocer el estado de la tecnología actual, para el control de tanques acoplados.

En la universidad de Piura, en Perú, Peter Gutarra desarrolló el control en un sistema de tanques acoplados, se utilizó el control predictivo PI. Se concluyó, que el control PI puede accionar de manera brusca las variables manipulables, pero posee mejor desempeño y ahorro de energía respecto al control PID. (CASTILLO, 2016)

En Cúcuta, Gerson Uribe, de la Universidad Francisco de Paula Santander, desarrolló un control *PID* para evaluar el desempeño en un sistema de tanques. Para el sistema estudiado, la constante I del PID fue casi despreciable, dando como resultado, un control PD que trabaja con un control *ON – OFF*.(URIBE, CASTRO, & ERNESTO, 2014)

En Barranquilla, Javier Vargas y otros, de la Universidad de los Llanos, desarrollaron un sistema de instrumentación y control para tanques de almacenamiento de agua donde visualiza la información de altura de los tanques en tiempo real, gracias al software LabView (VARGAS GUATIVA, LÓPEZ VELÁSQUEZ, & CONDE CÁRDENAS, 2017). En este proyecto, se realiza la captura de variables analógicas por medio de un conversor analógico- digital que procesa la señal para ser tomada por el controlador.

En la Universidad Francisco José de Caldas, en Bogotá, Ferney Spitia y Jeyson Ordoñez, desarrolla un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), para el control de nivel del tanque de mezcla, en este proyecto, se realizó el modelado del sistema e identificación del sistema, se desarrolló e implemento un sistema con control automático. (BERNAL ESPITIA & ORDOÑEZ BELTRAN, 2015)

En la misma institución, Universidad Francisco José de Caldas, Henry Solorzano, desarrolla una implementación de control *ON – OFF* en tanques de laboratorio, donde

se hace énfasis en la facilidad de implementación de este tipo de control vs el control *PID*, debido que el control *PID* necesita un mayor número de experimentos para la sintonización. (SOLÓRZANO GIL, 2015)

En este trabajo se diseñó el sistema de control y adquisición de datos para una planta de tanques acoplados de almacenamiento de hipoclorito. Los resultados obtenidos muestran que el sistema tiene un buen desempeño al implementar un control *ON – OFF* con histéresis, pues mantiene el nivel del líquido en el valor establecido y se evita el derrame del líquido.

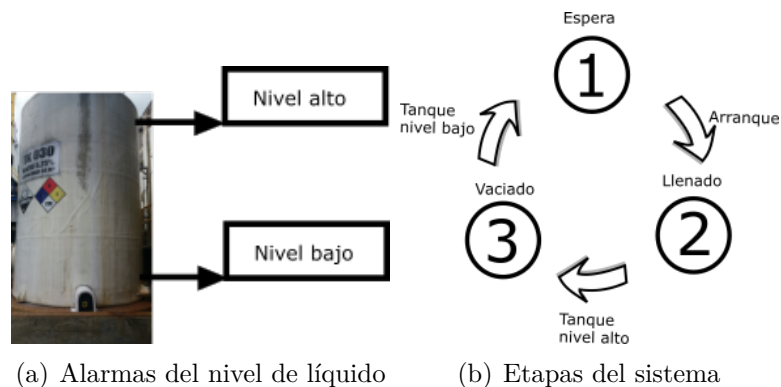
2.2. MARCO TEÓRICO

En la industria actual se mejoran los procesos para producir productos y servicios a menor costo; por lo anterior, es necesario utilizar nuevas tecnologías para suplir las necesidades. Se han venido desarrollando proyectos de automatización en todas las plantas, debido a que es necesario métodos de control que suplan la necesidad de supervisar todos los equipos que posee. Los procesos de control requieren instrumentos de medición para revisar el estado de los equipos y por otro lado, instrumentos de actuación para controlar los procesos, cumpliendo así las referencias estipuladas de diseño.

PROCESO DE CONTROL El proceso de control esta conformado por una serie de elementos que influyen en el comportamiento del sistema. Mediante la manipulación de las variables de control, se obtiene un dominio sobre las variables de salida, para lograr que estas permanezcan dentro de los umbrales definidos. (BROTONS, 2004)

SISTEMAS DE CONTROL SECUENCIAL Los sistemas de control secuencial son una sucesión de etapas de operación con acciones específicas y condiciones de transición entre ellas. En el sistema de tanques acoplados, existen tres etapas: Espera, Llenado y Vaciado, mostrado en la Figura 1.

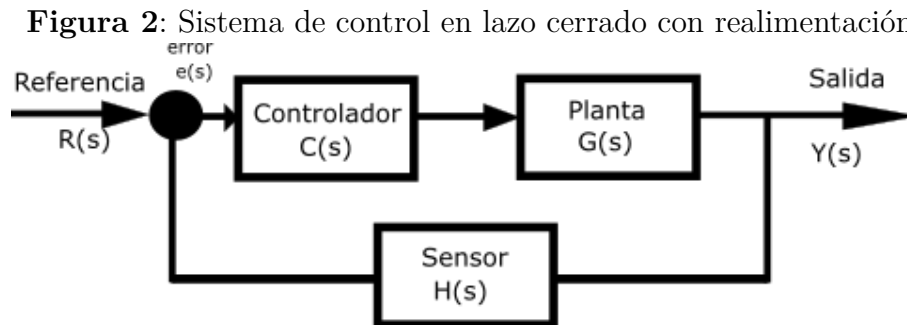
Figura 1: Control secuencial en un sistema de nivel



Fuente: autor

SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO Los sistemas de control en lazo cerrado alimentan al controlador con la señal de error del compensador, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. (NÚÑEZ ENRÍQUEZ, 2007)

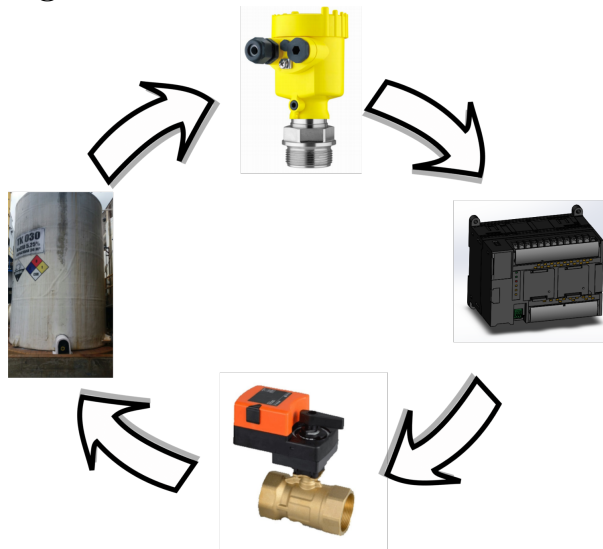
En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado, donde la variable controlada es la condición que se mide y controla, para este proyecto se controló la altura de los tanques; para este proyecto se utiliza un PLC en el controlador, en él, se realiza una comparación de la altura de los tanques respecto a la señal de referencia establecida que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia; El controlador brinda una señal de control, que manipula el funcionamiento de una válvula *ON-OFF*, haciendo que se encienda o se apague, cambiando las características de la planta, para controlar la variable de altura de los tanques.



Fuente: autor

En la Figura 3, se muestra el sistema de llenado controlado por un PLC, con la ayuda de un sensor y un actuador que permite la medición y el control de las señales. Este tipo de sistemas es conocido como sistemas de lazo cerrado. El sistema de control de los tanques se trabajó como un sistema de control secuencial, donde la lógica funciona de forma binaria, para actuar en una válvula *ON-OFF*.

Figura 3: Proceso de control en lazo cerrado



Fuente: autor

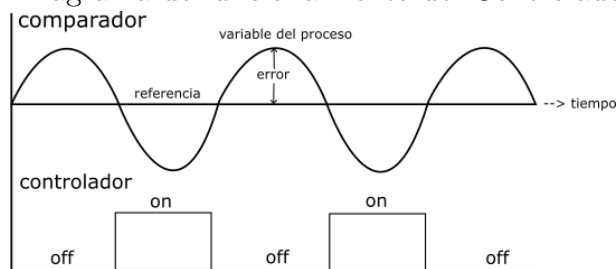
CONTROLADOR Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control que consiste en un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición). El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador automático se alimenta a un actuador, como un motor o una válvula neumáticos, un motor hidráulico o un motor eléctrico. (OGATA, 2003)

ACTUADOR El actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia. Se puede observar su función en el control, mostrado anteriormente en la Figura 3. (OGATA, 2003)

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN El instrumento de medición para este proyecto es un sensor de presión, es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Este elemento está en la trayectoria de realimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición. (OGATA, 2003)

CONTROLADOR ON-OFF El control ON-OFF es un tipo de control no lineal y proporciona a su salida, valores fijos que corresponden a conectado/desconectado según la señal de error. Inicialmente el error es positivo y el control activa las válvulas hasta llegar al valor deseado el error se hace negativo y el controlador desactiva las válvulas, Figura 4. El proceso se repite continuamente. Cabe tener en cuenta que una oscilación continua rápida puede provocar un desgaste excesivo del actuador de una válvula. (QUIPE AVILA, 2019)

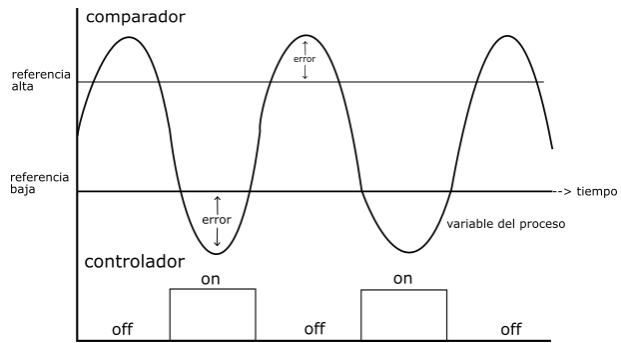
Figura 4: Diagrama de funcionamiento del Controlador ON-OFF



Fuente: autor

Para evitar dañar los dispositivos de control finales se le adiciona histéresis al control ON-OFF. De esta manera, la histéresis evitará cambios abruptos debido al cambio de estado del actuador para mantener la señal de referencia, Figura 5. Para el caso, que se desee una mínima diferencia respecto a la referencia solicitada, se disminuye el estado de histéresis usado en controles donde los cambios continuos del actuador no afectan su funcionamiento ni deterioran rápidamente su vida útil.

Figura 5: Diagrama de funcionamiento del Controlador ON-OFF con histéresis



Fuente: autor

2.3. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección, se definen los diferentes conceptos involucrados en el desarrollo del proyecto.

CONTROL REALIMENTADO: El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. (OGATA, 2003)

COMUNICACION ETHERNET: Ethernet/IP es un protocolo de red en niveles para aplicaciones de automatización industrial. Basado en los protocolos estándar TCP/IP. (SIEMON, 2013)

CX PROGRAMMER: Software de programación para todas las series de PLC de Omron. (OMRON)

DIAGRAMAS DE BLOQUES: Es una representación gráfica de los componentes, su función, y su relación entre ellos. Se puede representar un sistema con la planta, sus entradas y salidas. (OGATA, 2003)

DIAGRAMA DE BLOQUES DE FUNCIONES (FBD): Un lenguaje de diagramas de bloques secuenciales. (UNED, 2011)

DIAGRAMA DE FUNCIONES SECUENCIALES (SFC): Un lenguaje de bloques de funciones secuenciales. (UNED, 2011)

DIAGRAMAS DE TIPO ESCALERA LAD: Un lenguaje de diagramas de relés (denominado de tipo escalera). (UNED, 2011)

ELECTROVÁLVULAS: Una electroválvula es un dispositivo encargado de controlar el flujo, son consideradas también como válvulas electromecánicas pues éstas son controladas por una corriente eléctrica a través de una bobina solenoidal. (QUIMINET, 2011)

HMI: Significa “Human Machine Interface”, es decir es el dispositivo o sistema que permite el interfaz entre la persona y la máquina. (COBO, RAUL(2013))

LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN: Un lenguaje de programación es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como puede ser un ordenador. (UNED, 2011)

MATLAB: También llamado laboratorio de matrices, es un lenguaje de alto desempeño diseñado para realizar cálculos técnicos. (JAIME ESQUEDA,2002)

MÓDULOS ANALÓGICOS: Dispositivo conectado al PLC que recibe o envía señales de voltaje o corriente de manera analógica.

ENTRADAS ANALÓGICAS: permiten que los PLC tomen lectura de señales de tipo analógico como pueden ser la temperatura, la presión o el caudal y realiza es una conversión A/D, puesto que el autómatas solo trabajar con señales digitales. (UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, 2001)

PERTURBACIONES: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada. (OGATA, 2003)

PI&D: Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) también conocido del idioma inglés como piping and instrumentation diagram/drawing (PID) y es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental. (PIROBLOC, 2017)

PLANTA: Cualquier objeto físico que se va a controlar. Conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. (OGATA, 2003)

PLC (controlador logico programable): También conocido como autómeta programable es básicamente una computadora industrial la cual procesa las señales de entrada de sensores y envía señales a la salida que controlan diferentes actuadores cumpliendo con una secuencia programada en él. (INGENIERIA MECAFENIX, 2018)

PROCESO: Cualquier operación que se va a controlar. Un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, dirigidos hacia un resultado o propósito determinado. (OGATA, 2003)

PROTOCOLO HART DE DOS HILOS HART: Es un estándar de comunicación para equipos de campo usado a gran escala. El estándar HART transforma la señal analógica de 4–20 mA en una señal digital modulada apta para uso industrial. (SIEMENS)

SALIDAS ANALÓGICAS: Los módulos de salida analógica permiten que el valor de una variable numérica interna del autómeta se convierta en tensión o intensidad. Lo que realiza es una conversión D/A, puesto que el autómeta solo trabaja con señales digitales. (UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, 2001)

SENSOR DE PRESIÓN: El sensor de nivel es un dispositivo electrónico que mide la altura del material, generalmente líquido, dentro de un tanque u otro recipiente. (OMEGA, 2013)

SEÑAL DE CONTROL: La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. (OGATA, 2003)

SIMULINK: Es una toolbox especial de MATLAB que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Los modelos SIMULINK se guardan en ficheros con extensión *.mdl. (UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA, (2014)

SISTEMAS: Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. (OGATA, 2003)

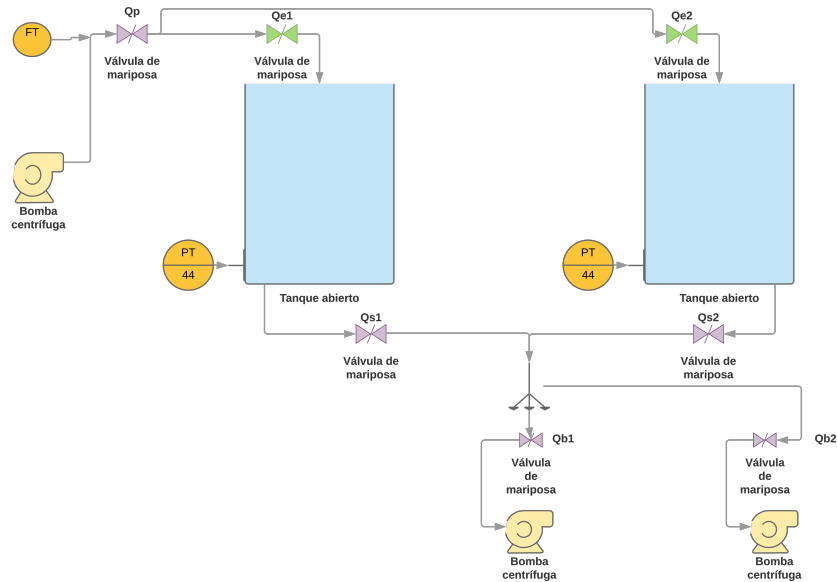
SISTEMAS LINEALES: Un sistema puede ser lineal si son proporcionales la entrada con la salida, esto cumple con la forma $Y=mx+b$. (OGATA, 2003)

TRANSMISOR DE PRESIÓN: Un transmisor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. (OMEGA, 2013)

VARIABLE CONTROLADA: La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. (OGATA, 2003)

3. DESCRIPCION DEL SISTEMA

Figura 6: Sistema de tanques de almacenamiento



Fuente: autor - Lucid Chart

En la Figura 6, se muestra la planta de tanques acoplados de almacenamiento de hipoclorito a la que se le diseñó e implementó el sistema de control de nivel y adquisición de datos.

El sistema está compuesto por dos tanques verticales de treinta metros cúbicos ($30 m^3$), los cuales se conectan llegando a una línea principal. Cada tanque cuenta con una válvula *ON – OFF* usada para cambiar las características de flujo de hipoclorito, dependiendo de la altura de nivel, también cuentan con un sensor de presión que permite el seguimiento de la altura.

Como se puede observar en la Figura 6, las válvulas de alimentación Q_{e1} y Q_{e2} , ubicadas en la parte inferior del tanque. Por otro lado, las válvulas Q_{s1} y Q_{s2} son válvulas de descarga que dirigen el contenido a un proceso diferente por medio de bombas hidráulicas, las válvulas son operadas individual y manualmente.

La línea principal de alimentación hacia los tanques cuenta con un medidor de flujo, el flujo de entrada se mantiene en promedio a $22 \text{ m}^3/h$. Sobre cada tanque se realizó la instalación de un transmisor de presión de 4 a 20 miliamperios mA .

Para el proyecto de control de nivel se realizó la instalación de la siguiente instrumentación:

Tabla 1: Lista de instrumentos instalados en la planta

Item	
Dispositivos	Descripción
1 Transmisor de presión	VEGA 82 HART 2 hilos de 4-20 mA
2 PLC	OMRON CP1L-EM30DT-D
3 Módulo de entradas Análogas	OMRON CP1W-AD041
4 Módulo de salidas Análogas	OMRON CP1W-DA041
5 HMI	NB7W-TW01B
6 Fuente de voltaje	Fuente de 24V 1.5A
7 Válvula ON-OFF	GF 233

Fuente: autor

La instrumentación instalada consta de dos sensores de presión, un tablero de distribución que contiene un PLC, un módulo de entrada analógica, un módulo de salida analógica, una pantalla HMI y adaptaciones eléctricas y electrónicas para la instalación de válvulas proporcionales, el detalle de la instrumentación utilizada y la instalación se desarrolla en el presente capítulo.

TABLERO DE CONTROL

El tablero de control consiste en un conjunto de paneles donde se distribuyen los dispositivos, los elementos de conexión y de protección contra sobrecorriente. El tablero se aloja en un gabinete en acero inoxidable instalado sobre la pared (Figura 7) y son accesibles solo por su frente.

Figura 7: Tablero de control



(a) Gabinete Acero Inox

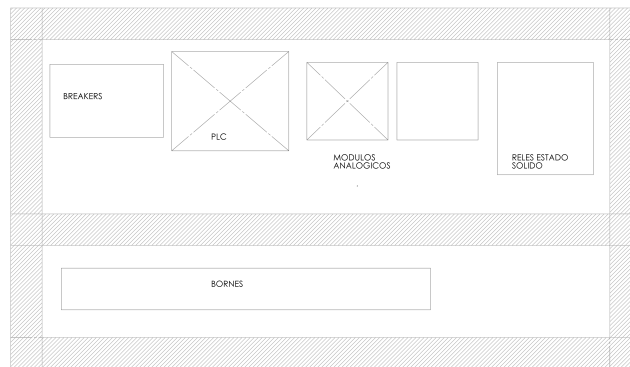
(b) Pulsadores e interruptores

Fuente: autor

Se realiza el diseño previo para la posterior fabricación del tablero eléctrico, se estima el espacio ocupado por los diferentes dispositivos en el plano adjunto, mostrado en la Figura 8. Las dimensiones estimadas del tablero eléctrico, fue un gabinete de $700\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ de fondo, el material utilizado es acero inoxidable debido al contacto con el ambiente químico.

En el tablero de control se encuentran alojados los equipos utilizados en el control como el PLC, el módulo de entrada analógica, el módulo de salida analógica, los breakers, los relés de estado sólido, las bornes y el respectivo cableado para la conexión de sus partes se puede observar en la Figura 9 y la Figura 10 . Además, se realiza la instalación de bandejas para caminos multicables que permite el paso direccionado de los cables de conexión dentro del tablero.

Figura 8: Esquema del tablero de control



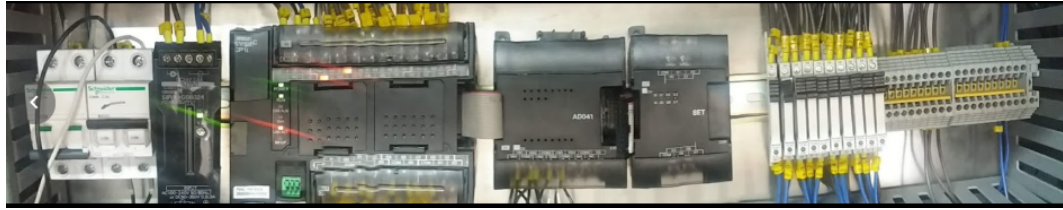
Fuente: autor

Figura 9: Instrumentación instalada en el tablero de control



Fuente: autor

Figura 10: Componentes tablero de control

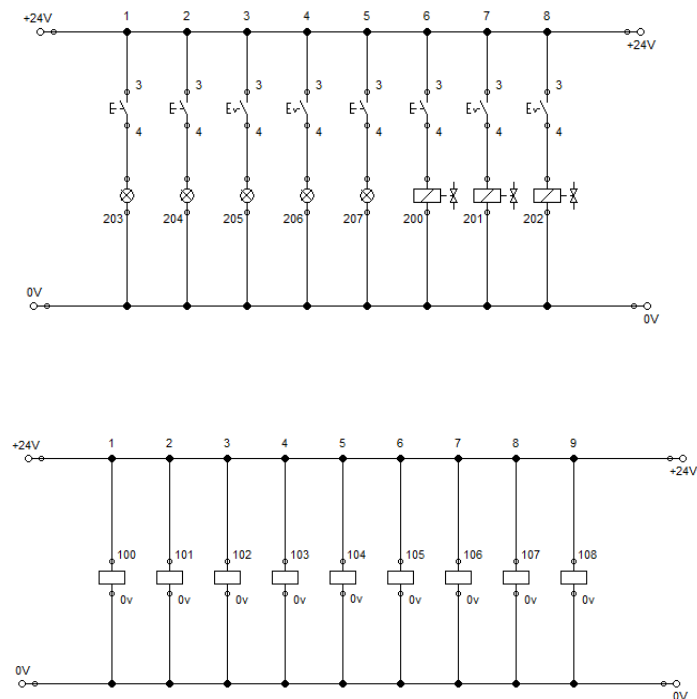


Fuente: autor

CONEXIÓN Y PLANO ELÉCTRICO

La conexión de la instrumentación se realizó basado en el plano eléctrico mostrado en la Figura 11.

Figura 11: Componentes tablero de control



Fuente: autor

Se instala tubería de protección de polietileno, para los cables individuales junto con la instalación de soportes de apoyo y los suministros e instalación de la tornillería necesaria en acero inoxidable mostrado en la Figura 12. Se utilizó un cable de 4 hilos apantallado, que permite, la protección de los cables contra agente externos y se realizó la conexión y nomenclatura por ambos extremos de todos los cables individuales y los multicables a sus respectivos origen y final de recorrido mostrado en la Figura 13.

Figura 12: Instalación de tubing eléctrico y soportes



Fuente: autor

Figura 13: Nomenclatura de las señales E/S del PLC



Fuente: autor

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

Se instaló el sensor de nivel VEGA 82 (Figura 14). La presión del nivel del fluido sobre el sensor provoca una deflexión de la membrana cerámica, y genera como resultado de la presión externa una variación de la capacidad y de la presión del fluido localizado dentro de la celda de medición.

Figura 14: Sensor de presión con celda cerámica



Fuente: VEGA, tomado de <https://www.vega.com/-/media/images/company/technology/lp-vegabar80-es.jpg>

La deformación es transformada proporcionalmente en una señal eléctrica y emitida como valor de medida de 4 a 20 mA a través de la señal de salida, esto quiere decir que, 0 centímetros de altura equivalen a 4 mA y 400 cm de altura equivalen a 20 mA , tal como se indica en las escalas de nivel de agua ubicadas a lo alto de los tanques.

El sensor vega posee un dispositivo de visualización y configuración llamado *DIS – ADAPT* el cual permite configurar la visualización de la altura en cm en el display. Se calibró mediante la siguiente configuración:

- Nivel mínimo de nivel: 9 cm

- Nivel máximo de nivel: 380 cm
- Offset mínimo: 0,5 %
- Offset máximo: 100 %
- Densidad: 1100 kg/m^3

Figura 15: Sensor de presión-Display de configuración



(a) Conexión sensor de presión

(b) Display DIS-ADAPT

Fuente: autor

Figura 16: Instalación del sensor en los tanques



Fuente: autor

ACTUADOR DEL SISTEMA DE CONTROL

Se instaló el la válvula de control GF 233 de accionamiento neumático (Figura 17). La válvula se encuentra acompañada de una electroválvula que recibe la señal del PLC; al recibir la señal permite el paso de aire logrando la apertura de las válvulas neumáticas.

Figura 17: Válvula de bola de accionamiento neumático



Fuente: Autor

La electroválvula tiene instalada una unidad de mantenimiento mostrada en la Figura 18 que permite mantener la calidad del aire y protege los dispositivos.

Figura 18: Sensor de presión con celda cerámica



Fuente: Tomado de: <http://icohhn.com/producto/f-r-l-unidad-de-mantenimiento-serie-lfc-dos-cuerich-02553873/>

4. DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR

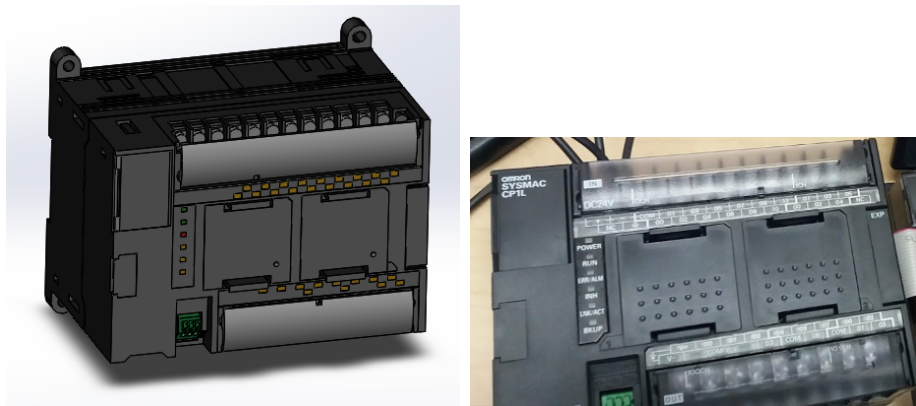
El controlador del sistema se realizó por medio de un dispositivo electrónico programable también llamado *PLC* o *Controlador Lógico Programable* que desarrolla de manera secuencial una serie de instrucciones con acciones de control del sistema.

CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

El *PLC OMROM CP1L – EM30DTD* posee 18 entradas digitales y 12 salidas digitales, también cuenta con dos salidas análogas de voltaje (Figura 19). En el PLC se añade un módulo de extensión analógica *CP1W – AD041*, que permite la lectura de la señal emitida de corriente brindada por el sensor de presión.

Se instaló un pantalla *HMI* o *Human Machine Interface* que permite la comunicación humano-máquina y visualizar el nivel de altura y volumen del tanque, y realizar la apertura y cierre de las válvulas de llenado de los tanques.

Figura 19: PLC Omron CP1LEM30DT



(a) CAD del PLC

(b) PLC físico

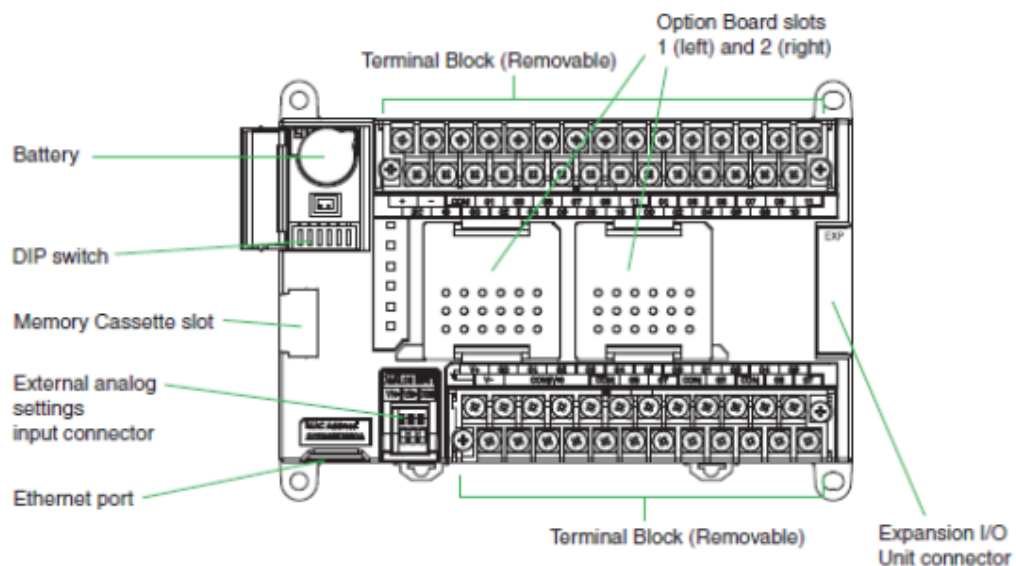
Fuente: autor

La alimentación del PLC es de 24 V, se alimenta a través de una fuente de 24 V y 1,5 A. La protección de la fuente a su vez se realiza por medio de 2 breakers, un breaker

para la protección señal de 110 V de la alimentación externa, y un breaker para la protección de la señal de 24 V dirigida a los equipos del tablero de control.

En las terminales superiores se localizan las entradas digitales, de modo que reciben la señal de los pulsadores y selectores del tablero eléctrico, además poseen dos terminales para la alimentación del dispositivo, el cual va conectado a la fuente, mostrados en la Figura 20. En los terminales inferiores se encuentran las salidas digitales que envían la señal a las válvulas proporcionales, su función es controlar la apertura y cierre.

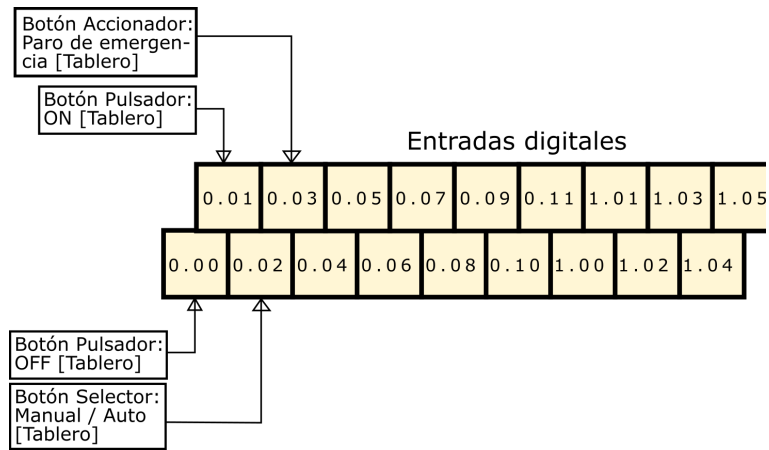
Figura 20: Componentes PLC



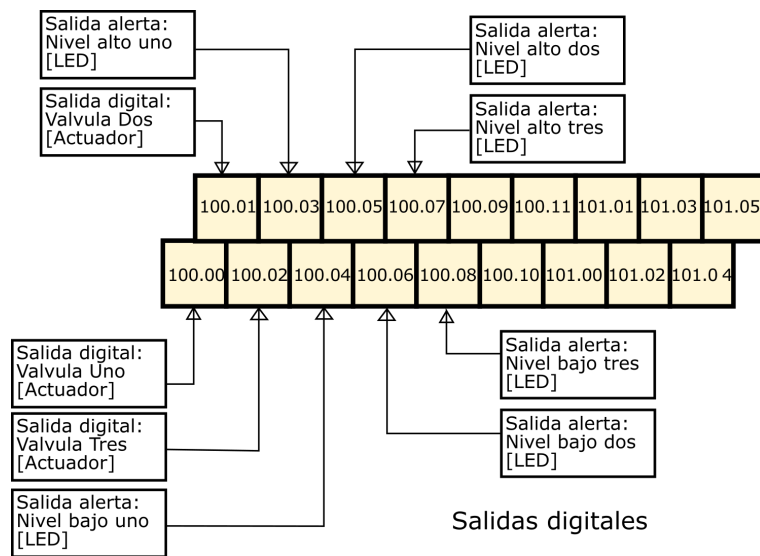
Fuente: Omron tomado de Manual PLC Omron, https://assets.OMRON.eu/downloads/manual/es/v1/w461cp1e_cp1l_getting_started_guide_es.pdf

Se observa en la Figura 21, la conexión de los contactos físicos con el PLC, el origen y la salida de cada punto.

Figura 21: E/S digitales del PLC



(a) Entradas digitales



(b) Salidas digitales

Fuente: autor

Por medio del software *CXprogrammer* de OMRON (Figura 22) se realiza la programación del control utilizando bloques de funciones y ladder.

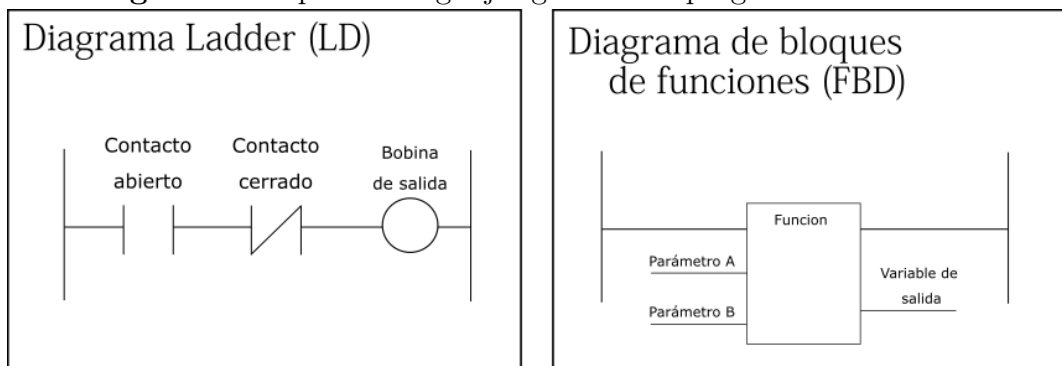
Figura 22: CX-Programmer de OMRON



Fuente: OMRON, Licencia obtenida por la empresa, Tomado de <https://industrial.OMRON.es/es/products/cx-programmer>

Actualmente existen lenguajes de programación gráficos que permiten un diseño más ágil que los lenguajes textuales, entre los lenguajes gráficos se encuentran el diagrama escalado ladder y el diagrama de bloques mostrados en la Figura 23.

Figura 23: Tipos de lenguajes gráficos de programación de PLC



Fuente: autor

MÓDULOS DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS

Los módulos permiten la extensión de lectura o envío de señales (Figura 24). Los módulos se conectan al PLC por medio de una extensión lateral la cual permite realizar la instalación de varios módulos en serie (Figura 25).

Figura 24: Módulo de entradas analógicas



Fuente: Tomado de: [https://media.digikey.com/Photos/Omron %20Elect %20Photos/CP1W-AD041sml.jpg](https://media.digikey.com/Photos/Omron%20Elect%20Photos/CP1W-AD041sml.jpg)

Figura 25: Módulo de entrada analógica conectado a PLC por medio de adaptador.

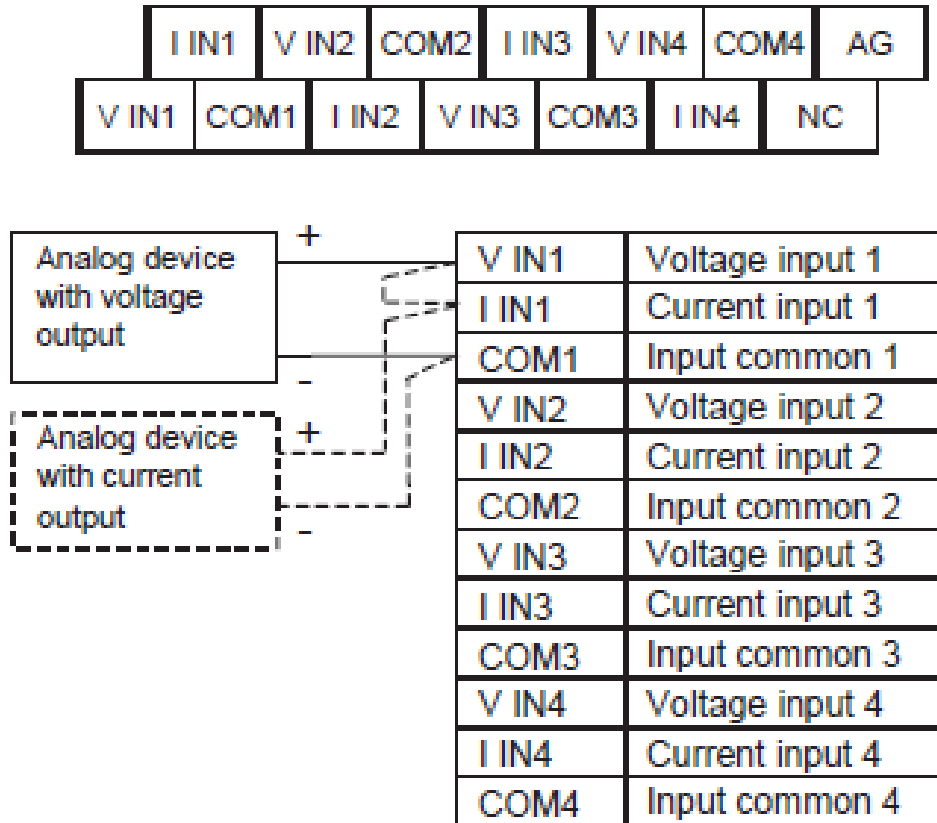


Fuente: autor

Para la toma de la señal recibida por el transmisor, se realizó la instalación de un módulo de entrada analógica, que realiza la lectura de 4 a 20 mA . Debido a que el

sensor posee la configuración *HART* de 2 hilos, se realizó el cableado en serie entre el sensor, el módulo y la fuente. La conexión se detalla en la Figura 26.

Figura 26: Modo de conexión de dispositivo en el módulo analógico



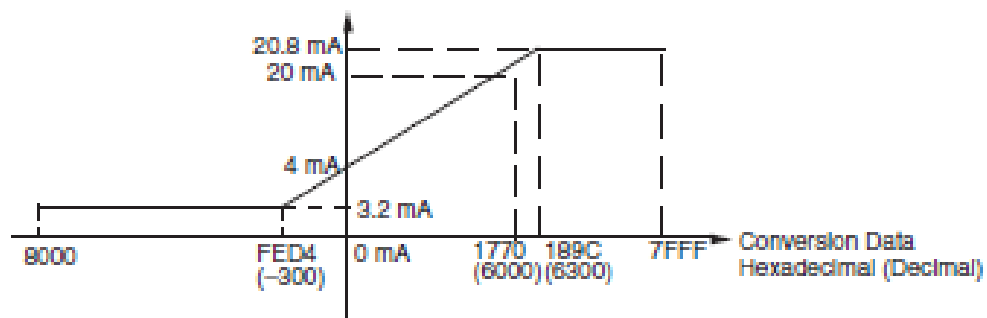
Fuente: Omron tomado de Manual PLC Omron, <https://assets.OMRON.eu/downloads/manual/es/v1/w461cplcplggettingstartedguide.es.pdf>

Como lo evidencia el plano, el sensor analógico posee una conexión positiva y una negativa. Para cada sensor, la conexión negativa se conectó directamente a la conexión positiva de la fuente de voltaje, Por otra parte, la conexión positiva se conectó a los puertos V_{IN1} y I_{IN1} del módulo de entrada analógica. Para el caso de la fuente de voltaje, fue necesario realizar la conexión en serie para que la comunicación fuera efectiva entre el sensor y el módulo de entradas analógicas. Por tal razón, se realizó la conexión entre la parte negativa de la fuente de voltaje y el COM o puerto común del módulo de

entrada analógica.

Después de establecida la conexión de la instrumentación, el módulo realiza la transformación de la señal a un lenguaje de computador, explicando de otro modo, la señal del sensor, la cual es, una señal de 4 a 20 mA , se convierte en el módulo de entrada analógica a una señal de 0 a 6000 bits de resolución tal como lo enuncia la Figura 27.

Figura 27: Señal que recibe el módulo al conectar una señal de 4 a 20 mA



Fuente: Omron tomado de Manual PLC Omron, https://assets.OMRON.eu/downloads/manual/es/v1/w461cp1e_cp1l_getting_started_guide_es.pdf

Como se presenta en el siguiente gráfico, la señal que recibe el *PLC* va desde 0000(*HEX*) para una señal de corriente 4 mA hasta 1770(*HEX*) para una señal de corriente de 20 mA .

HMI HUMAN MACHINE INTERFACE

Para la interacción del control con el operador se instala un HMI human machine interface, donde el operario puede visualizar el nivel de los tanques y realizar la apertura y cierre de las válvulas proporcionales. El HMI instalado es un *NB7W – TW01B* de marca OMRON de conexión Ethernet de pantalla de 7" y alimentación 24V, mostrado en la Figura 28.

Figura 28: Human-Machine Interface OMRON



Fuente: Tomado de: <https://es.rs-online.com/web/p/displays-hmi-de-pantalla-tactil/8211807/>

Al ser de la *serie NB* el software diseñado para la programación es el *NB – Designer* de la marca *OMRON* (Figura 29).

Figura 29: Software de programación HMI NB-DESIGNER



Fuente: Tomado de: <https://1.bp.blogspot.com/>, Licencia obtenida por la empresa

Se estableció la comunicación entre *HMI* y *PLC* mediante un protocolo *Ethernet* tal como se observa en la Figura 30.

Figura 30: Conexión Ethernet para la comunicación PLC-HMI



(a) Puerto Ethernet en HMI

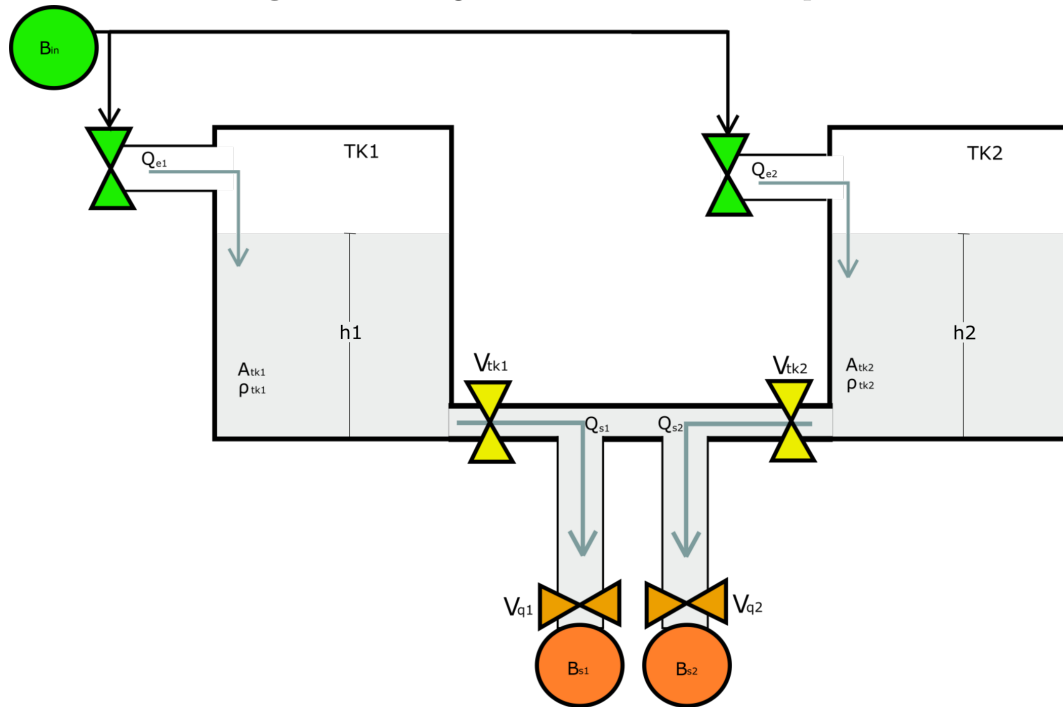


(b) Conexión Ethernet entre PLC y HMI

Fuente: autor

5. MODELADO DE LA PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS

Figura 31: Diagrama del sistema de tanques



Fuente: autor

La Figura 31 representa la configuración de la planta de tanques acoplados con el cual se realizó este trabajo, a continuación, se describe el modelo matemático. Donde,

- Q_{e1} = Es el caudal de la alimentación del *Tanque₁*
- Q_{e2} = Es el caudal de la alimentación del *Tanque₂*
- Q_{s1} = Es el caudal de salida de la válvula V_{q1}
- Q_{s2} = Es el caudal de salida de la válvula V_{q2}

A partir de la ecuación de Bernoulli se puede determinar la velocidad del fluido, cuando no se encuentran abiertas las válvulas de salida, gracias a la Ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h_2 \quad (5.1)$$

Siendo,

P_1 = presión de entrada del fluido

P_2 = presión de salida del fluido

g = constante gravitacional = $9,8m/s^2$

ρ = densidad del fluido = $1100kg/m^3$

h = altura de nivel del líquido en el tanque = m

Despejando la velocidad de la ecuación de bernoulli, para el caso de un orificio ubicado en la parte inferior del tanque, con una presión atmosférica al inicio y final del trayecto del fluido, y densidad del hipoclorito al 5.5%, se tiene que:

Velocidad del fluido en un orificio

$$v = \sqrt{(2 * g * h_1)} \quad (5.2)$$

Por otra parte, se define como flujo de volumen (Q) a la cantidad de fluido que pasa en determinado tiempo, se expresa como área (A) por velocidad (v), brindando unidades de metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Caudal Volumétrico

$$Q = A * v \quad (5.3)$$

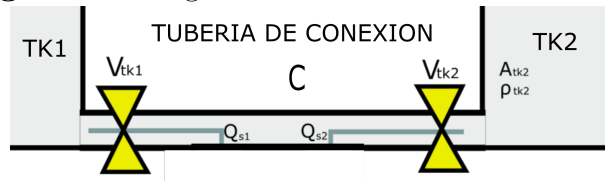
Por lo tanto, para los casos caudal de la salida 1 y caudal de la salida 2, el caudal permanece constante:

Caudal de salida tanque 1 = Q_{s1}

Caudal de salida tanque 2 = Q_{s2}

Para el caudal en la tubería de conexión mostrada en la Figura 32 se tiene que,

Figura 32: Diagrama de la conexión entre tanques



Fuente: autor

Caudal de interconexión tanque 1 y tanque 2= $C_{1-2} * a_a * \sqrt{2g} \sqrt{(h_1 - h_2)}$

Donde,

a_a = Área de sección de la tubería, esta dimensión no cambia a lo largo de la red de salida.

Siendo,

$$a_a = \frac{\pi}{4} (0,1016)^2 = 0,0081 m^2$$

C_{1-2} = Coeficiente de descarga, entre la conexión existente en el tanque 1 y el tanque 2. Obtenido mediante el análisis de llenado del tanque 2, con alimentación desde el tanque 1.

Siendo,

$$C_{1-2} \approx 27,87$$

Luego, se realizó un cambio de variables, dando como resultado una variable general para cada ecuación que comprenda las variables como lo son, constante de descarga, área transversal del tubo del fluido y la constante gravitacional.

$$C_{1-2} * a_a \sqrt{2g} = C$$

Flujo volumétrico a través de la conexión entre los tanques

$$Q_{1-2} = C \sqrt{(h_1 - h_2)} \quad (5.4)$$

En este sistema la acumulación de volumen es igual a la diferencia de lo que entra menos lo que sale y, los estados son las alturas de los dos tanques h_1 y h_2 .

Entonces,

$$\frac{dM}{dt} = \dot{M}_{in} - \dot{M}_{out} \quad (5.5)$$

$$Acumulación = Entra - Sale \quad (5.6)$$

El volumen almacenado mantiene su área constante por lo que la altura es la variable que cambiaría en el tiempo.

$$Acumulación = A * \frac{dh}{dt} = q_{entrada} - q_{salida} \quad (5.7)$$

Donde, A = Área de sección del tanque, representa las dimensiones transversales del tanque, esta dimensión no cambia a lo largo de la altura del tanque.

Siendo,

$$A = \frac{\pi}{4} (3,0902)^2 = 7,5068 \text{ m}^2$$

6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

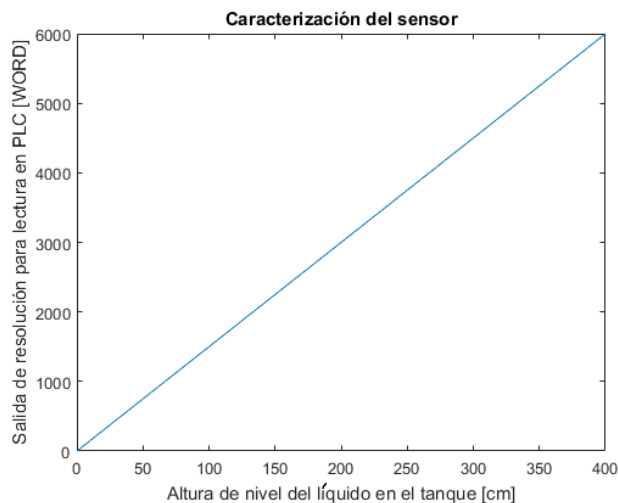
En este capítulo se muestra la caracterización del sistema para determinar el valor de los parámetros físicos. Se realizó un proceso de adquisición de datos en la dinámica de llenado y vaciado de los tanques. Finalmente, se comparó la respuesta del sistema real y la respuesta del modelo matemático.

CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

El sensor transforma la señal de presión ejercida por el líquido en el tanque, en una señal eléctrica entre 4 y 20 mA. La presión generada es proporcional al nivel del líquido.

La señal eléctrica es tomada por el PLC por medio de un módulo de entradas analógicas; en el módulo, la señal de corriente es convertida a una señal binaria tipo WORD de valores entre 0 y 6000, tal como lo muestra la Figura 33.

Figura 33: Conversión de corriente del sensor a palabra de resolución (WORD)




Fuente: autor

Esta resolución es determinada en la ficha técnica del módulo analógico. Tal como se

muestra en la Figura 34.

Figura 34: Especificación de resolución de un CP1W-AD041

Analog I/O Units



Analog Input Unit
CP1W-AD041
Analog inputs: 4 (resolution: 6,000)

Analog Output Unit
CP1W-DA021
Analog outputs: 2 (resolution: 6,000)

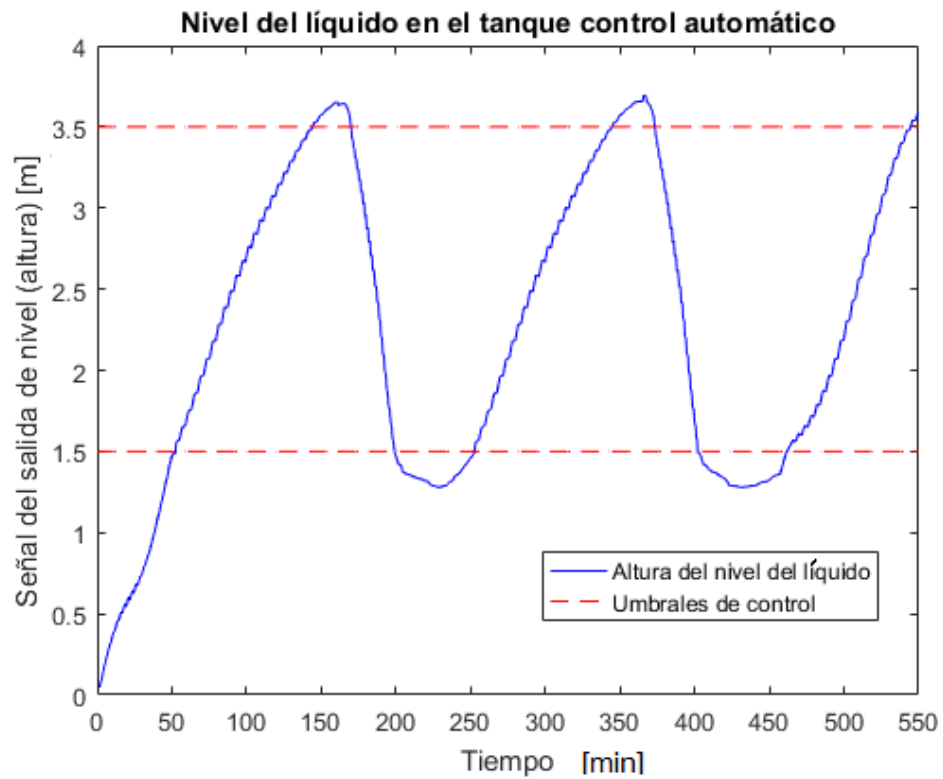
CP1W-DA041
Analog outputs: 4 (resolution: 6,000)

Fuente: OMRON

DEFINICIÓN DE LOS UMBRALES DE HISTÉRESIS

Los umbrales de disparo para controlar el nivel en los tanques fueron definidos entre 1.5 m y 3.5 m (Figura 35).

Figura 35: Umbrales de histéresis de la señal recibida del sensor en bits de resolución

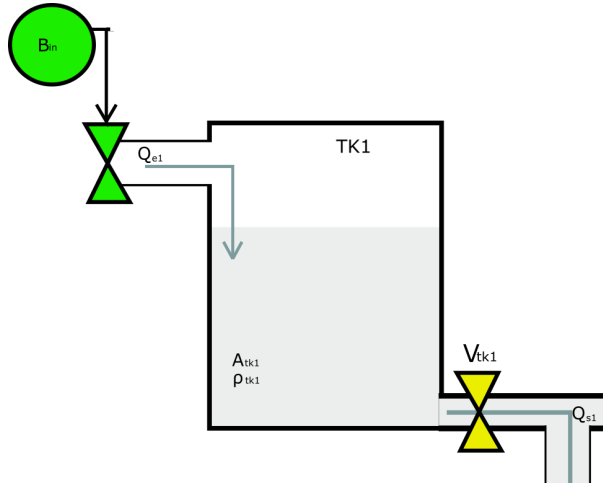


Fuente: autor

CASO 1: LLENADO DEL TANQUE

Se caracterizó la dinámica de llenado del tanque, bajo las condiciones de tener las válvulas de salida cerradas y un caudal de entrada constante. El diagrama pictórico se puede ver en la Figura 36.

Figura 36: Sistema de tanques en carga



Fuente: autor

El presente modelo, se define como:

Modelado: Llenado del sistema

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_e}{A_{tk1}} \quad (6.1)$$

donde,

$$Q_e = \text{Caudal de entrada [m}^3/\text{min]} = 0,1917 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$A_{tk} = \text{Área de sección transversal del tanque m}^2 = 7,5068 \text{ m}^2$$

Integrando la ecuación diferencial del modelo, se obtiene la ecuación de salida que corresponde con la altura en el tanque en función del tiempo expresado en minutos:

Ecuación de salida del modelo de llenado de tanques

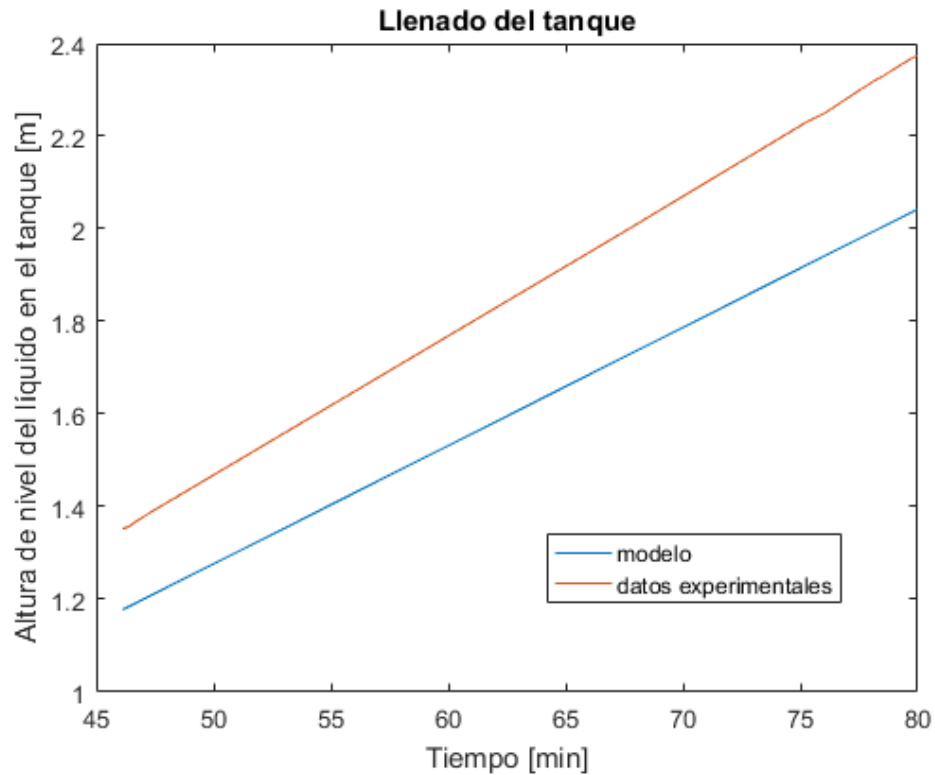
$$h_1 = \frac{Q_e}{A_{tk1}} t = 0,0255t + ci \quad (6.2)$$

donde,

$c_i = \text{Condición inicial del sistema} = 0,1745 \text{ m}$

Se compara la salida del modelo (nivel del líquido en el tanque) respecto a los datos experimentales en el rango de tiempo entre 45 y 80 minutos, como se muestra en la Figura 37.

Figura 37: Sistema de tanques en carga



Fuente: autor

Utilizando una regresión lineal para los datos experimentales, la ecuación de salida $h(t)$ obtenida es:

Ecuación de salida del llenado de tanques real

$$h_{real} = 0,0302t - 0,0434 \quad (6.3)$$

Se calcula el porcentaje de error entre los datos reales y el modelo como:

Cálculo del error en el llenado

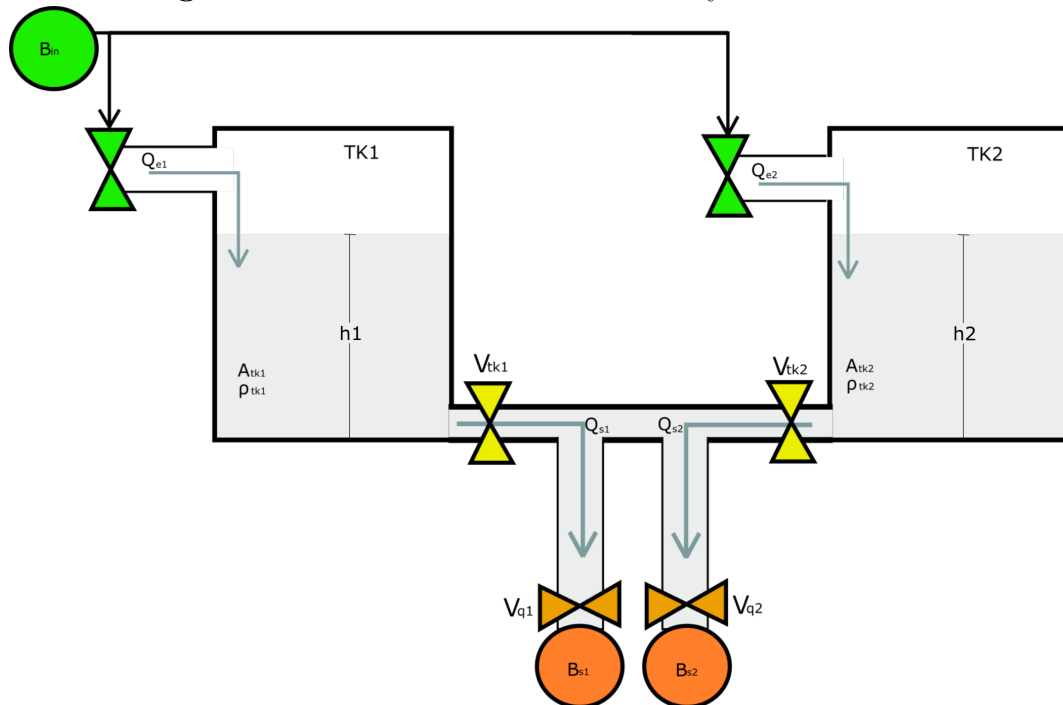
$$error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{h_1 - h_{real}}{h_1} \right| * 100 = 6,14 \% \quad (6.4)$$

donde, N = Número de datos en el intervalo de tiempo

El modelo matemático presenta un error del 6.14 % respecto los datos experimentales.

CASO 2: VÁLVULAS DE ENTRADA Y SALIDA ABIERTAS

Figura 38: Caso 2: Válvulas de entrada y salidas abiertas



Fuente: autor

El área de sección transversal de los tanques y los flujos de entrada son iguales; además, los flujos de salida Q_{s1} , Q_{s2} se asumen constantes debido a que estos son controlados por motobombas. Luego, se tiene

Modelado: Llenado del sistema

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_{e1}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s1}}{A_{Tk}} \quad (6.5)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_{e2}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s2}}{A_{Tk}} \quad (6.6)$$

Donde,

- Q_{e1} = Caudal de entrada en el tanque uno $[\frac{m^3}{\text{min}}] = 0,1917 [\frac{m^3}{\text{min}}]$
- Q_{s1} = Caudal de salida en el tanque uno $[\frac{m^3}{\text{min}}]$
- Q_{e2} = Caudal de entrada en el tanque uno $[\frac{m^3}{\text{min}}] = 0,1917 [\frac{m^3}{\text{min}}]$
- Q_{s2} = Caudal de salida en el tanque uno $[\frac{m^3}{\text{min}}]$
- A_{Tk} = Área de sección transversal del tanque = $7,5068 \text{ m}^2$

Integrando se obtiene la ecuación de altura en los tanques en función del tiempo expresado en minutos:

Ecuación de altura en los tanques

$$h_1 = \left(\frac{Q_{e1}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s1}}{A_{Tk}} \right) t + ci_1 = \left(0,0255 - \frac{Q_{s1}}{7,5068} \right) t + ci_1 [m] \quad (6.7)$$

$$h_2 = \left(\frac{Q_{e2}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s2}}{A_{Tk}} \right) t + ci_2 = \left(0,0255 - \frac{Q_{s2}}{7,5068} \right) t + ci_2 [m] \quad (6.8)$$

Donde,

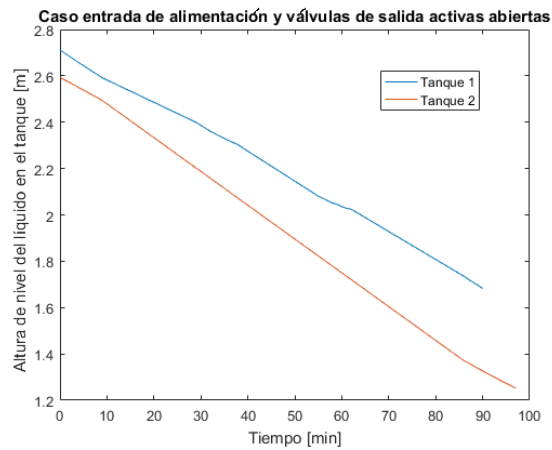
$ci_1 =$ Condición inicial del sistema tanque 1= 2,712 m

$ci_2 =$ Condición inicial del sistema tanque 2= 2,593 m

Ya que la salida de los tanques es forzada mediante bombas que realizan la succión del hipoclorito.

A partir de los datos experimentales, se obtiene la siguiente gráfica (Figura 39).

Figura 39: Datos Experimentales en condiciones de caso mostrado



Fuente: autor

Utilizando una regresión lineal para los datos experimentales, la ecuación de salida obtenida de cada tanque es:

Ecuaciones de salida según datos experimentales

$$h_{1real} = -0,0113t + 2,7080 [m] \quad (6.9)$$

$$h_{2real} = -0,0142t + 2,6066 [m] \quad (6.10)$$

A partir de las ecuaciones se tiene que las pendientes de las ecuaciones de salida de cada tanque son: $m_1 = -0,0113$ $m_2 = -0,0142$

A partir de la Ecuación 6.7 y 6.8, se tiene que,

$$m_1 = \left(\frac{Q_{e1}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s1}}{A_{Tk}} \right) \quad (6.11)$$

$$m_2 = \left(\frac{Q_{e2}}{A_{Tk}} - \frac{Q_{s2}}{A_{Tk}} \right) \quad (6.12)$$

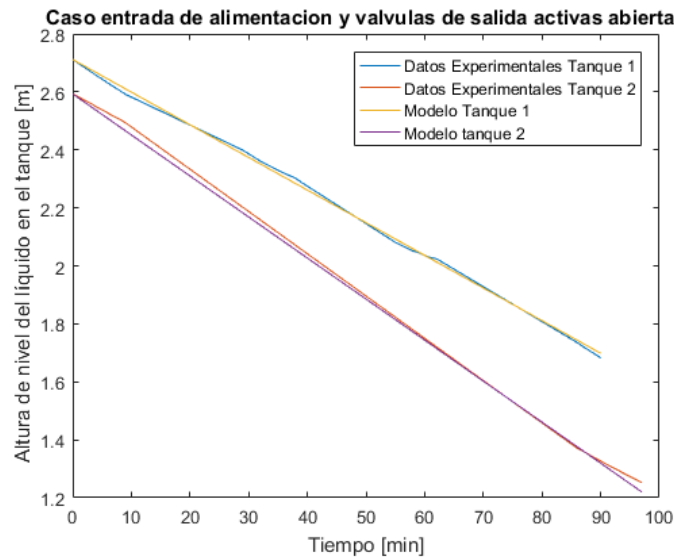
Se despeja los caudales de salida Q_{s1}, Q_{s2} .

$$Q_{s1} = Q_{e1} - (A_{Tk} * m_1) = 0,2979 \frac{m^3}{min} \quad (6.13)$$

$$Q_{s2} = Q_{e2} - (A_{Tk} * m_2) = 0,2762 \frac{m^3}{min} \quad (6.14)$$

Se compara en la Figura 40 la salida del modelo (nivel del líquido en el tanque) respecto a los datos experimentales en el rango de tiempo entre 0 y 100 *minutos*.

Figura 40: Comparación de modelo vs datos experimentales en tanque 1 y 2



Fuente: autor

Se calcula el porcentaje de error entre los datos reales y el modelo como:

Cálculo del error en el llenado del tanque 1 y del tanque 2

$$error_{tk1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{h_1 - h_{real}}{h_1} \right| * 100 = 0,46 \% \quad (6.15)$$

$$error_{tk2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{h_2 - h_{real}}{h_2} \right| * 100 = 0,865 \% \quad (6.16)$$

donde, N = Número de datos en el intervalo de tiempo

El modelo matemático presenta en el tanque uno, un error del 0.46 % respecto a los datos experimentales y en modelo matemático del tanque dos, un error del 0.865 % respecto a los datos experimentales.

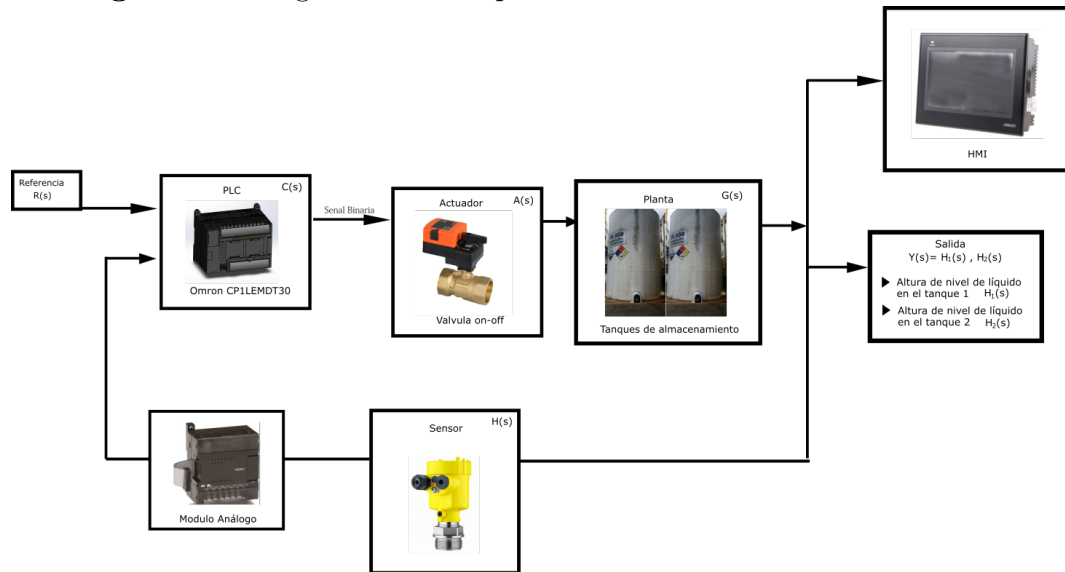
7. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL

En este capítulo se describe el proceso de desarrollo del código de control implementado en el *PLC* mediante el software *CX – Programmer* de *OMRON*.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA

Se muestra en la Figura 41, el diagrama de bloques del sistema de control de tanques acoplados. El controlador es un PLC Omron *CP1L – EM30DT*, se desarrolla el algoritmo de control mediante código de programación ladder y bloques de función, además, se direcciona las señales digitales y analógicas a una pantalla HMI, que visualiza la información en tiempo real.

Figura 41: Diagramas de bloques del sistema. Secuencia del control



HMI

Fuente: autor

DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE ESTADOS

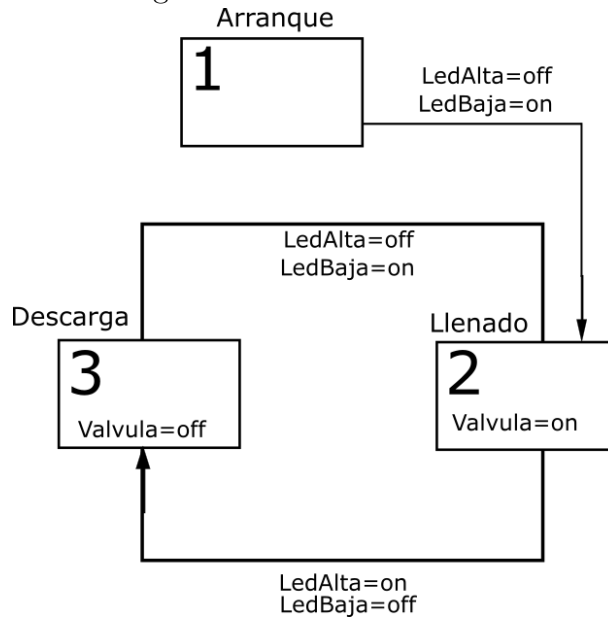
El diagrama de transición de estados que se puede ver en la Figura 42 describe el comportamiento secuencial del controlador *ON – OFF* con *histéresis* para el sistema de control de nivel de líquido en los tanques.

Estado 1: Arranque Se inicializa el sistema y se mide la señal del nivel del líquido en el tanque. Se realiza la transición del estado 0 al estado 1, cuando el nivel de líquido en el tanque se encuentra por debajo del umbral inferior.

Estado 2: Llenado En este estado, se activa la válvula que permite el ingreso de caudal para el llenado del tanque y sólo cambia al estado 3 cuando se alcanza el umbral superior.

Estado 3: Descarga/Vaciado En este estado, se desactiva la válvula de ingreso de caudal y sólo cambia al estado 2 cuando se alcanza el umbral inferior.

Figura 42: Diagrama de estados del control del sistema



Fuente: autor

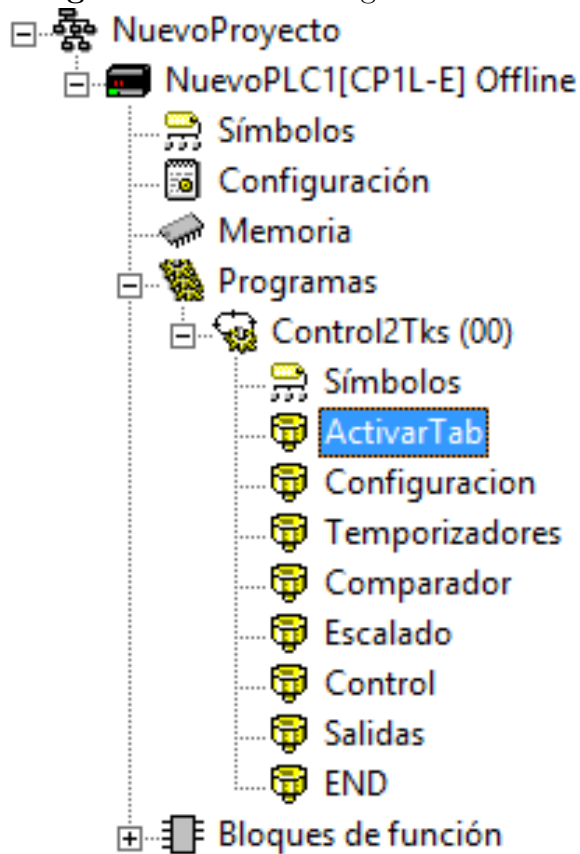
Donde,

$LedBaja$: Nivel del líquido en los tanques por debajo del umbral inferior $LedAlta$ =Nivel del líquido en los tanques por encima del umbral superior $Válvula$ =Estado de la válvula de alimentación de los tanques

ESTRUCTURA GENERAL DE LA PROGRAMACIÓN DEL PLC

El algoritmo de control está compuesto por 7 secciones que pertenecen al programa general '*Control2Tks*', mostradas en la Figura 43.

Figura 43: Estructura general del PLC



Fuente: autor, CX-Programmer

- **ACTIVARTAB:** Recibe la señal de los pulsadores e interruptores ubicados en el tablero de control.
- **CONFIGURACIÓN:** Configura la lectura de señales a través del módulo analógico.
- **TEMPORIZADORES:** Establece tiempos de inicialización mientras se estabiliza la lectura de los sensores.
- **COMPARADOR:** Compara las señales recibidas de los sensores respecto a las señales de referencia.

- **ESCALADO:** Convierte las señales digitales resultado de la conversión analógico-digital al valor de la variable física equivalente (volumen y altura).
- **CONTROL:** Establece las condiciones para la apertura o cierre de válvulas.
- **SALIDAS:** Dirige la señal de salida a los puertos físicos del PLC.

Se detallan la programación y desarrollo de las diferentes secciones.

Sección ACTIVARTAB En la sección 'ActivarTab', se reciben las señales de entrada de los pulsadores e interruptores alojadas en el tablero de control, ver Figura 44.

Figura 44: Pulsadores e interruptores del tablero de control

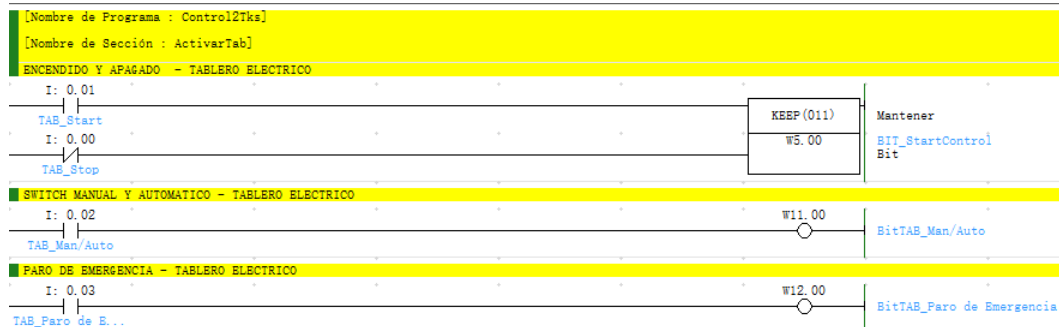


Fuente: autor

Para mantener el estado de las señales lógicas generadas por los pulsadores de encendido y apagado, se necesita un bloque de función *KEEP*.

Las señales recibidas de los pulsadores e interruptores, se asignan a direcciones de memoria interna ($w5,00$, $w11,00$ y $w12,00$) del PLC para su posterior uso.

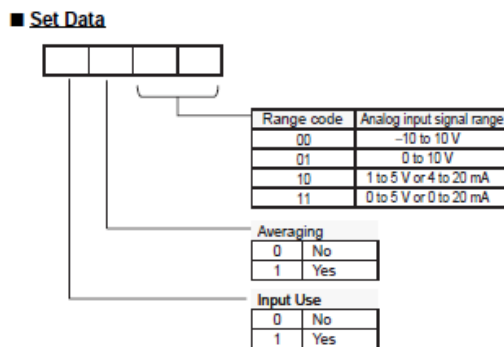
Figura 45: Sección de programa: Activar



Fuente: autor

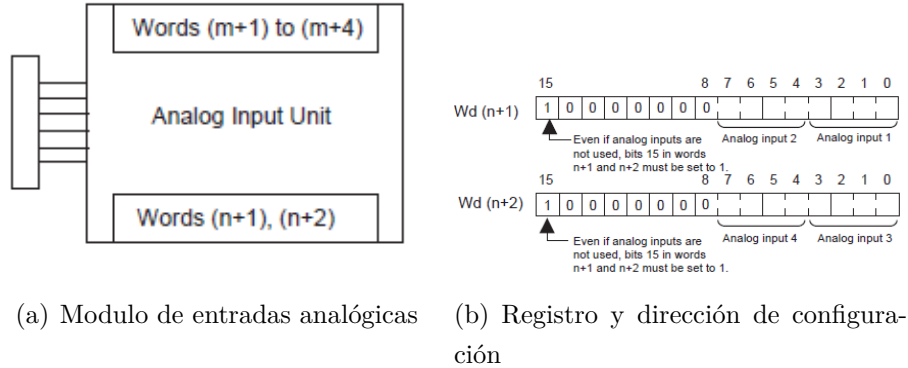
Sección CONFIGURACIÓN Para realizar la lectura de las señales analógicas, es necesario configurar los 8 bits menos significativos de los registros 102 y 103 del módulo analógico *CP1W – AD041* de acuerdo al tipo de señal recibida; es decir, si es una señal de voltaje o una señal de corriente. La configuración se puede ver en la Figura 46 y Figura 47. Como los sensores de presión generan señales de corriente y se utilizan los canales '*Analog input 1*' y '*Analog input 2*' la palabra binaria de configuración del registro 102 se puede ver en la Figura 48.

Figura 46: Configuración asignada para los parámetros requeridos

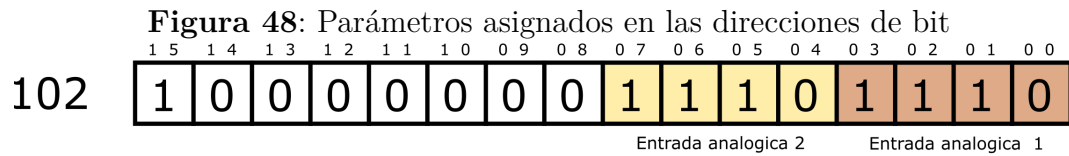


Fuente: OMRON tomado de Manual PLC Omron, https://assets.OMRON.eu/downloads/manual/es/v1/w461cp1ecp1l_getting_started_guide_es.pdf

Figura 47: Direcciones para asignar parámetros al PLC



Fuente: Omron tomado de Manual PLC Omron, <https://assets.OMRON.eu/downloads/manual/es/v1/w461cplcplggettingstartedguide.es.pdf>

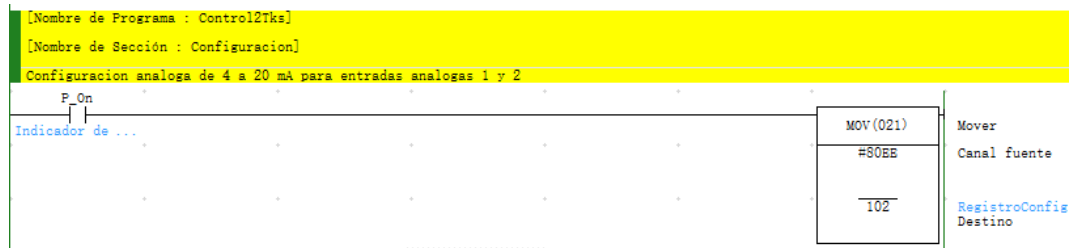


Fuente: autor

Se convierte la palabra binaria [WORD] asignada al registro 102 a sistema hexadecimal [HEX], siendo,

En la sección 'Configuración', se asigna al registro 102 la palabra de configuración mediante el bloque de función MOV.

Figura 49: Sección de programa: Configuración

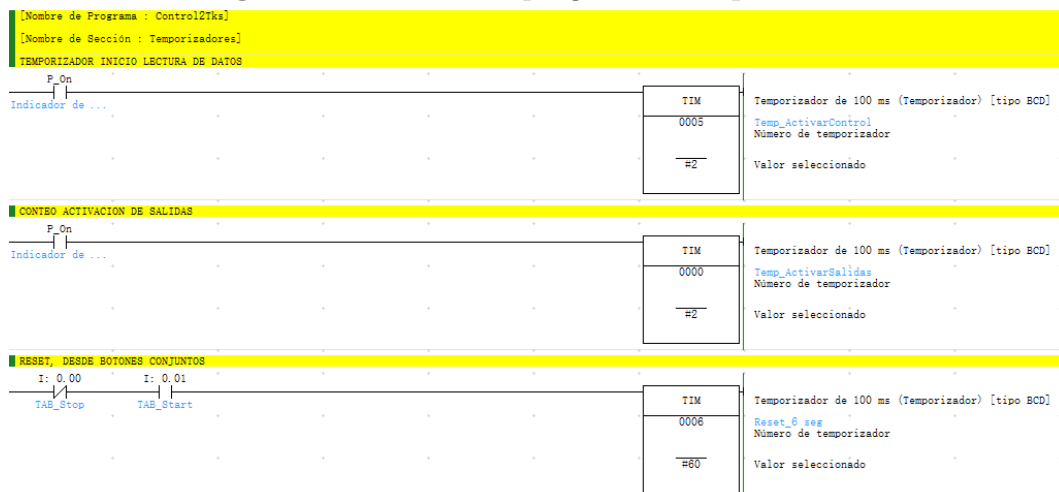


Fuente: autor, CX-Programmer

Sección TEMPORIZADORES En esta sección se añaden 3 temporizadores, donde:

- TIM05 Permite la inicialización del programa automático y la lectura del módulo analógico después de pasados 0.2 s.
- TIM00 Permite la activación de las señales de salidas a las válvulas después de pasados 0.2 s.
- TIM06 Establece el tiempo de 6 s para activar la función de RESET.

Figura 50: Sección de programa: Temporizadores



Fuente: autor, CX-Programmer

Sección COMPARACIÓN En esta sección se compara la señal correspondiente a la altura de nivel del líquido en los tanques respecto a los umbrales de disparo configurados en el PLC.

Debido a que el PLC contiene los canales 0 y 1 que ocupan las entradas digitales, la señal 'Entrada analógica 1' y 'Entrada analógica 2' del módulo analógico se corresponden con los canales 2 y 3 en la programación del PLC.

El comparador lee la señal del *canal 2* y el *canal 3*, luego se compara con los umbrales superior e inferior, dando como resultado una señal binaria que indica si el nivel de los tanques supera el umbral superior o se encuentra por debajo del umbral inferior, tal como se muestra en la Figura 51.

El diagrama ladder de la Figura 51, se corresponde con la siguiente estructura de programación.

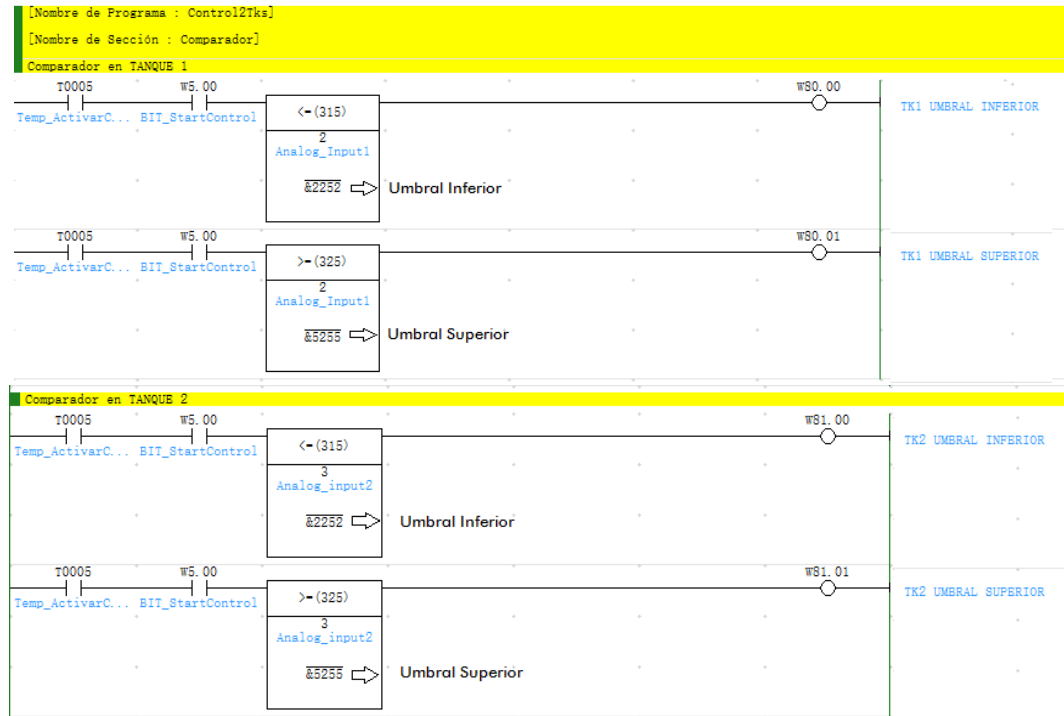
```
if niveltk1 <= umbral_inferior
  W80.00 = '1'
  else
  W80.00 = '0'
end
```

```
if niveltk1 >= umbral_superior
  W80.01 = '1'
  else
  W80.01 = '0'
end
```

Los umbrales de comparación se definen entre $1,5\text{ m}$ y $3,5\text{ m}$ cuyos valores digitales [WORD] equivalentes son:

$$1,5\text{ m} = 2252 \quad y \quad 3,5\text{ m} = 5255$$

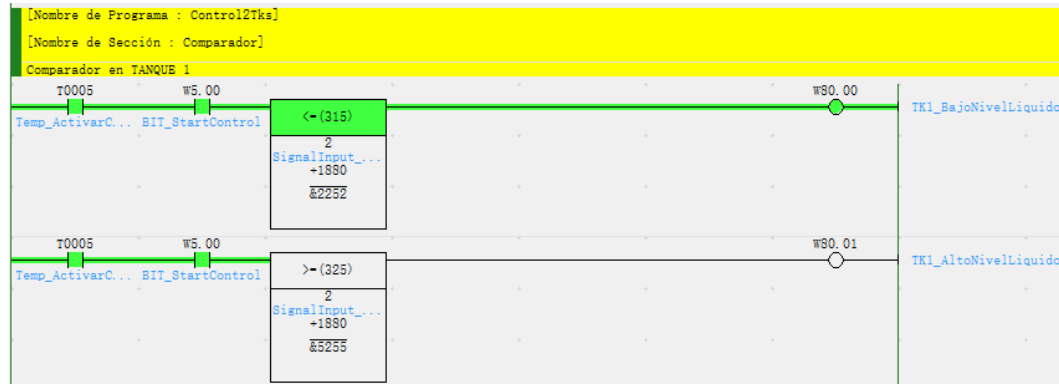
Figura 51: Sección de programa: Comparador



Fuente: autor, CX-Programmer

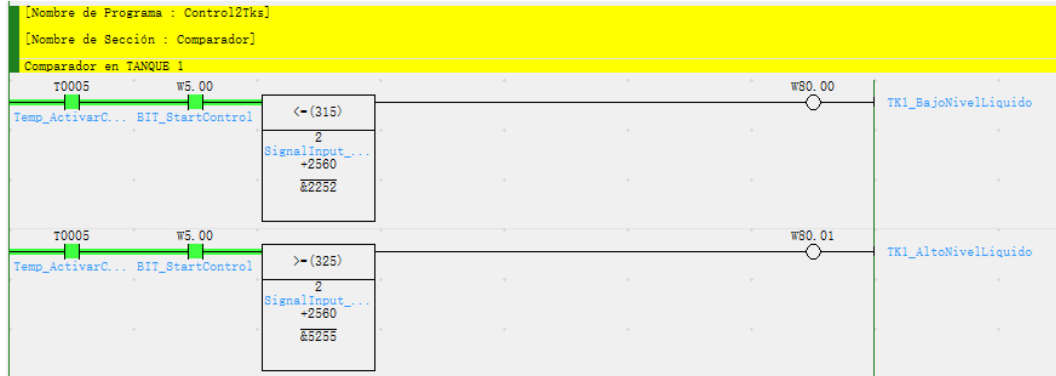
En la figura 52, 53 y 54 se muestra la activación de las señales cuando el nivel del líquido en el tanque supera el umbral superior, cuando el nivel está por debajo del umbral inferior y dentro del rango de nivel deseado.

Figura 52: Prueba de nivel bajo: Comparador en tanque 1



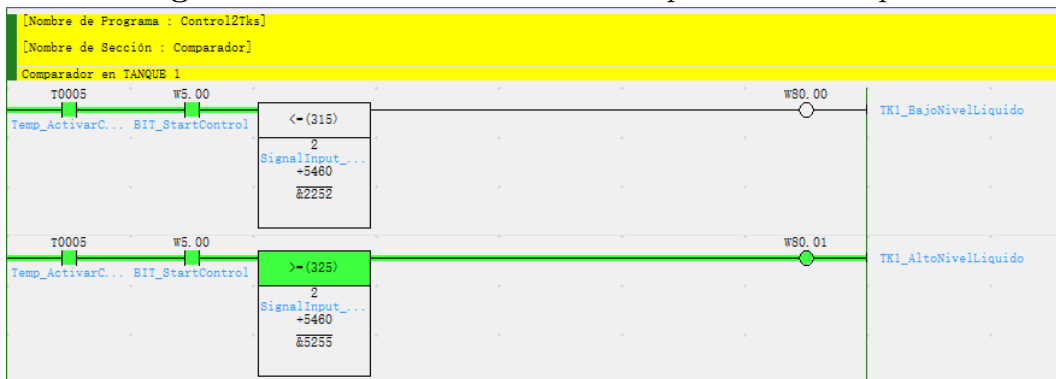
Fuente: autor, CX-Programmer

Figura 53: Prueba de nivel en rango: Comparador en tanque 1



Fuente: autor, CX-Programmer

Figura 54: Prueba de nivel alto: Comparador en tanque 1



Fuente: autor, CX-Programmer

Sección ESCALADO En esta sección se convierte las señales digitales resultado de la conversión analógico-digital al valor de la variable física equivalente (*volumen* y *altura*).

Para utilizar la señal recibida de la 'Entrada Analógica 1' es necesario re asignar la entrada a la variable interna *D2*, luego se realiza operaciones aritméticas dando como resultado valores físicos reales para el volumen del líquido en el tanque (Ecuación 7.1) y la altura del nivel del líquido en el tanque (Ecuación 7.2).

Como:

$$6000 (WORD) = 30 m^3 \quad (7.1)$$

Entonces, la señal $D2$ se divide en 20 para obtener valores entre 0 y 300, porque en la programación de la pantalla HMI se ubica el punto decimal en las unidades lo que permite visualizar los valores entre 00,0 y 30,0 m^3 .

Como,

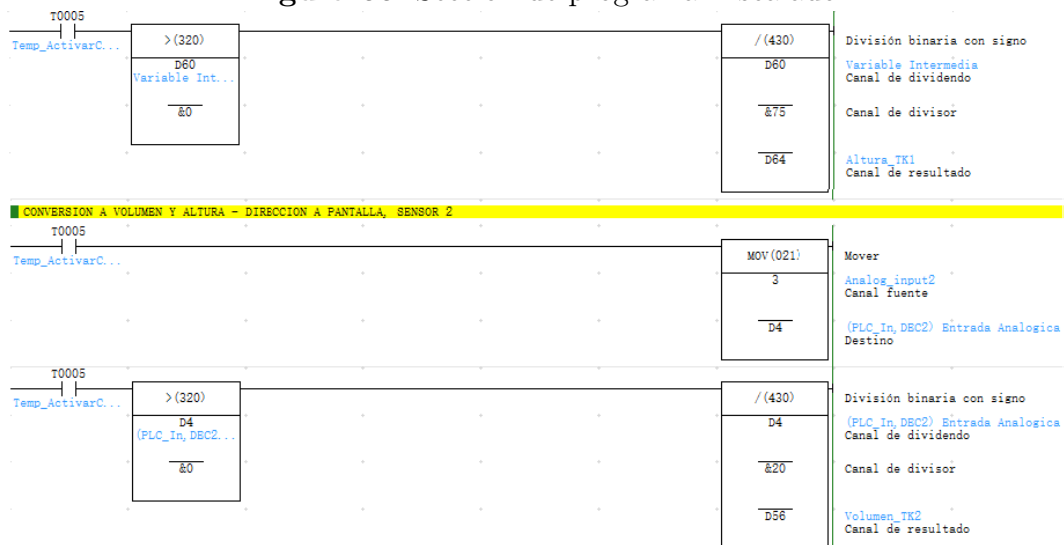
$$6000 (WORD) = 4m \quad (7.2)$$

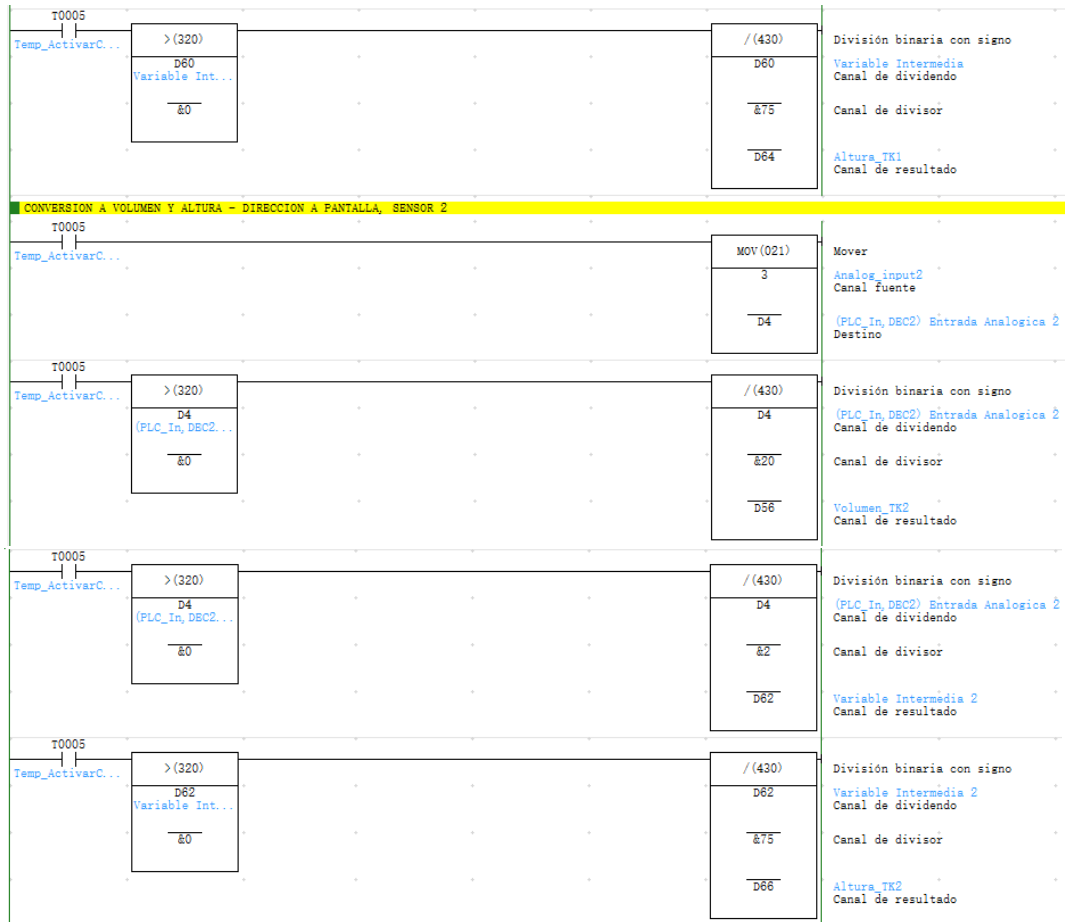
Y se sabe que:

$$altura = h = \frac{v}{A} = \frac{volumen}{area} \quad (7.3)$$

Entonces, la señal $D2$ se divide en 2 para obtener valores entre 0 y 3000, y nuevamente se divide en 75 para obtener valores entre 00 y 40. En la programación de la pantalla HMI se ubica el punto decimal en las unidades lo que permite visualizar los valores entre 0,0 y 4,0 *metros*.

Figura 55: Sección de programa: Escalado

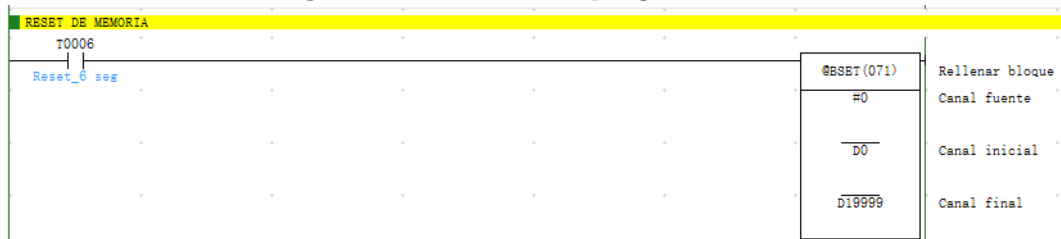




Fuente: autor, CX-Programmer

Se añade la función de *RESET* que permite borrar los datos almacenados en las direcciones 'D' donde se alojan los datos de palabra doble (*DWord*), como el volumen y la altura de nivel de líquido en los tanques, mostrado en la Figura 56.

Figura 56: Sección de programa: Reset



Fuente: autor, CX-Programmer

Las direcciones D ($DWord$) del PLC son enviadas a la pantalla HMI , donde el operario puede visualizar el volumen y altura de los tanques, visto en la Tabla 2.

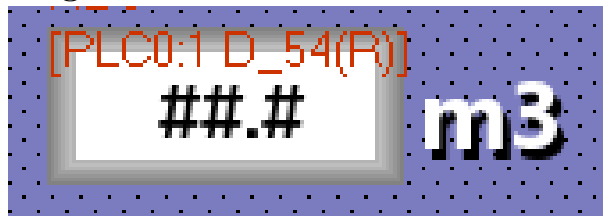
Tabla 2

Dirección	Variable física
D54	Volumen TK1
D64	Altura TK1
D56	Volumen TK2
D66	Altura TK2

Fuente: autor

En la pantalla HMI se asignan los datos al visualizador numérico Figura 57. La configuración del visualizador numérico se puede ver en la Figura 58 y Figura 59; donde se configura la dirección a leer y el número de dígitos enteros y decimales.

Figura 57: Visualizador Numérico - HMI



Fuente: autor, *NB-Designer*

Figura 58: Dirección de lectura Visualizador Numérico - HMI

Dirección de Lectura

HMI: HM10 | PLC: 0

Puerto: Net

Cambiar No. Nodo: 1

Área/Etiqueta: D

Dirección: 54 | Memoria de Sistema

Formato: BIN | Tamaño (words): 1

Formato (Rango): DDDDD (0-32767)

Usar Etiqueta de Dirección

Usar Direccionamiento Indirecto

Fuente: autor, NB-Designer

Figura 59: Definir decimales del dato recibido - HMI

Básicas | Datos Numéricos | Fuente | Gráficos | Configuración de la Visualización

Tipo de Datos: Unsigned integer | Tamaño: WORD

Entero: 2 | Decimal: 1

Ajuste del Valor Máx/Mín: Máx. 999 | Mín. 0

Máx/Mín. Indirectos

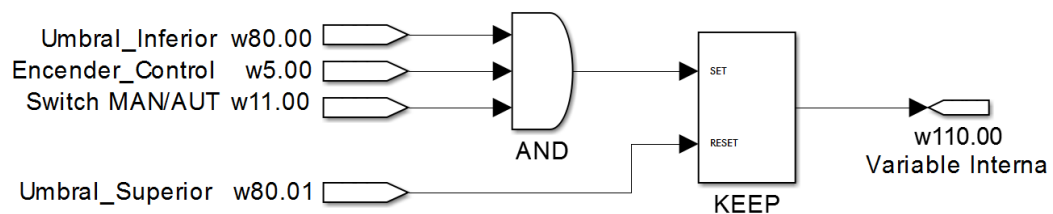
Sobre el límite superior: Color

Fuente: autor, NB-Designer

Sección CONTROL Es posible configurar el sistema para que trabaje en modo de control manual o automático.

Control en modo automático: en la Figura 60 se muestra el diagrama lógico equivalente a la sección control '*modo automático*'. La variable interna (*w110,00*) se activa (1 lógico) cuando las señales 'umbral inferior' (*w80,00*), 'control encendido' (*w5,00*) e 'interruptor de manual/automático' (*w11,00*) se encuentren activas; y se desactiva (0 lógico) cuando el nivel del líquido en el tanque se encuentra por encima del umbral superior, detectado por la activación de la variable (*w80,01*).

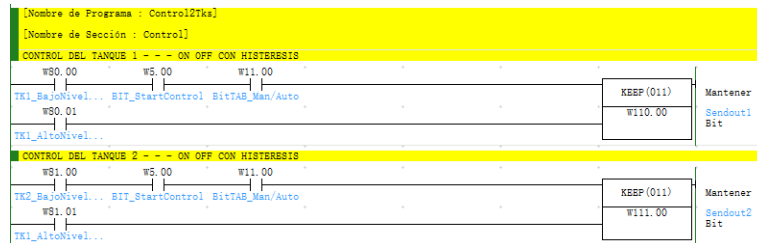
Figura 60: Diagrama lógico del control automático



Fuente: autor, Simulink

En la Figura 61 se describe en lenguaje ladder la programación del control en modo automático del PLC, expuesto en el párrafo anterior.

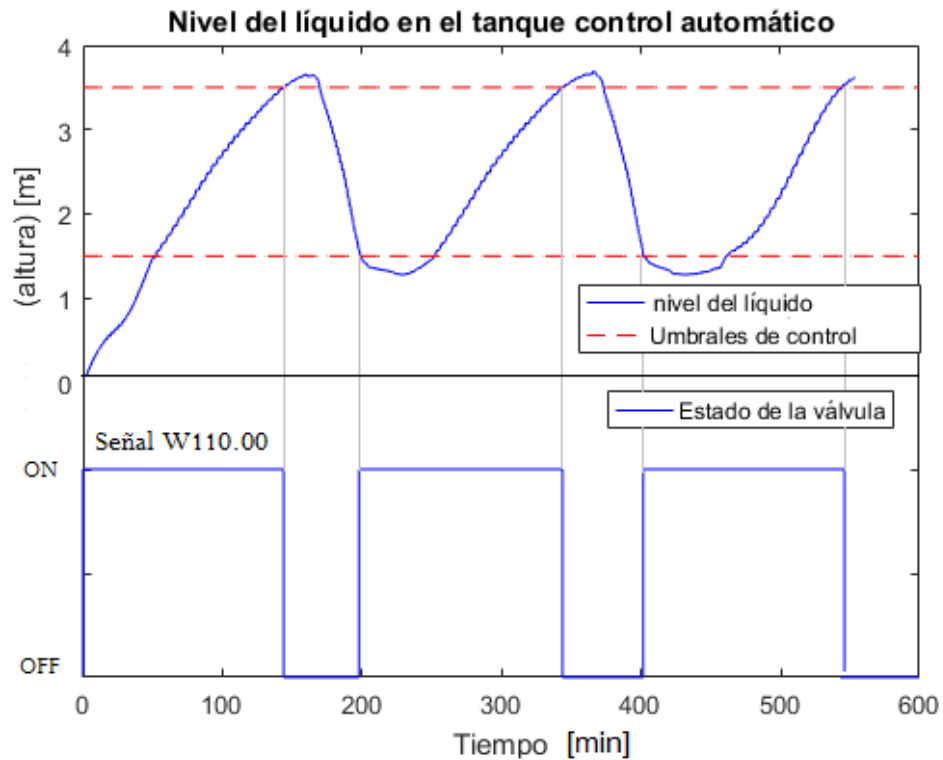
Figura 61: Diagrama ladder Modo control automático



Fuente: autor, CX-Programmer

En la Figura 62 se observa el funcionamiento del controlador en modo automático.

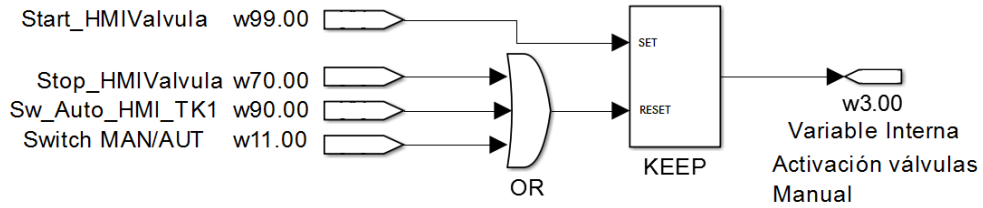
Figura 62: Comportamiento del nivel de líquido en el tanque con el control



Fuente: autor

Control en modo manual: En la sección control '*modo manual*', el operario puede activar o desactivar las válvulas de alimentación de los tanques desde la pantalla HMI. Las operaciones lógicas mostradas en la Figura 63 muestran la activación manual de la válvula (*w3,00*) la cual se activa cuando la señal encendido de válvula en la pantalla (*w99,00*) también se encuentre activo y se desactivada cuando la señal apagado de válvula (*w70,00*), interruptor de manual automático en pantalla (*w90,00*) o interruptor de manual automático en el tablero (*w11,00*) se encuentren activos.

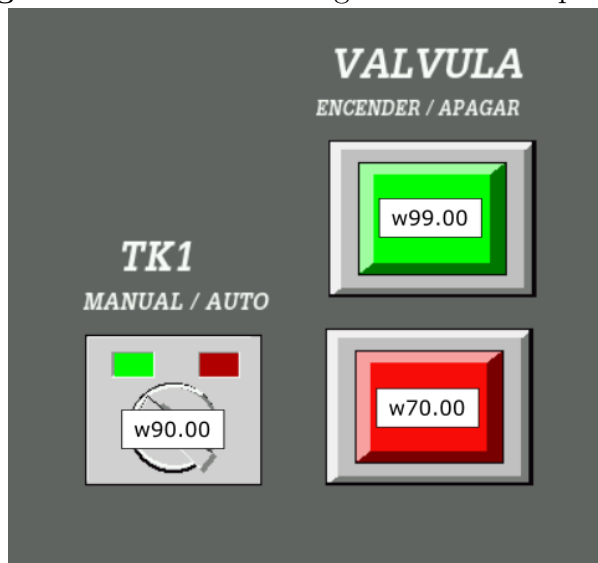
Figura 63: Diagrama lógico del control manual



Fuente: autor, Simulink

Donde las direcciones de las funciones utilizadas se muestran en la Figura 64.

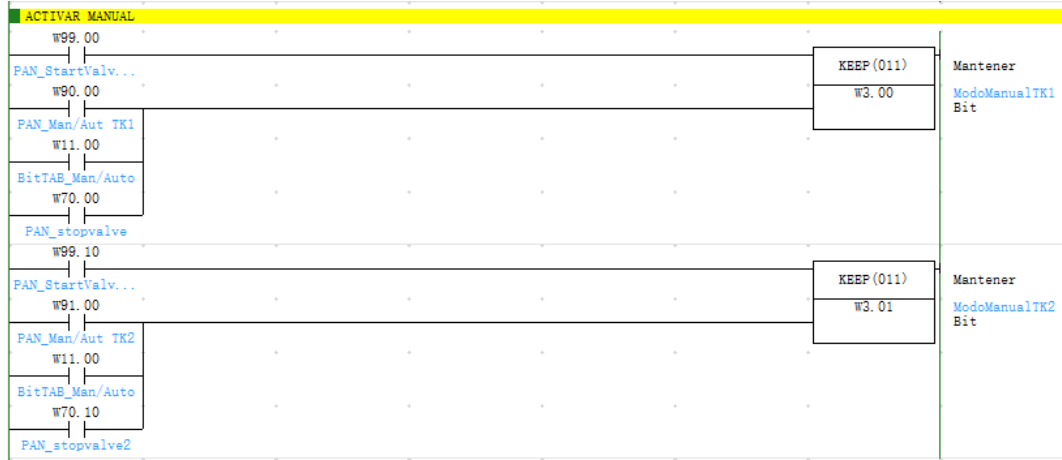
Figura 64: Direcciones asignadas desde la pantalla



Fuente: autor, NB - Designer

En la Figura 65 se describe en lenguaje ladder la programación del control manual del PLC, expuesto en el párrafo anterior.

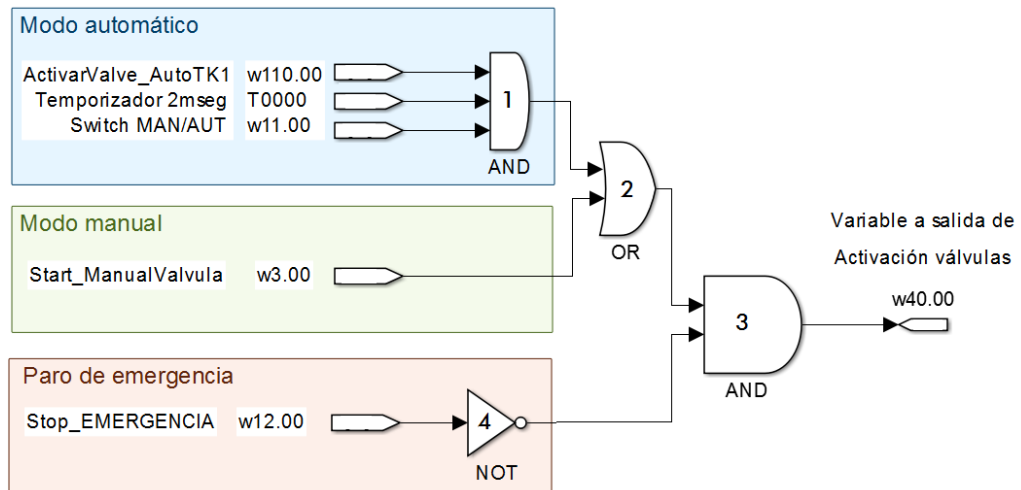
Figura 65: Sección de programa: Control - Manual



Fuente: autor, CX-Programmer

Activar señal de salida para válvulas: En la Figura 66 se observa que mientras el paro de emergencia se encuentre inactivo, la activación de las válvulas de alimentación se realiza cuando el conjunto 'modo automático' o el conjunto 'modo manual' se encuentre activo.

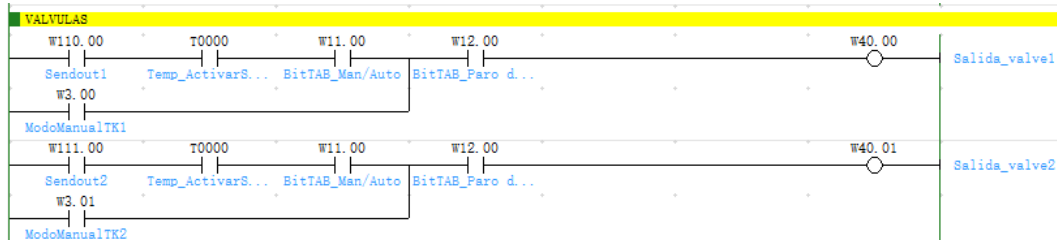
Figura 66: Diagrama lógico de activación de válvulas



Fuente: autor, Simulink

En la Figura 67 se observa el diagrama ladder de la programación para la activación de las válvulas, expuesto en el párrafo anterior.

Figura 67: Sección de programa: Control válvulas

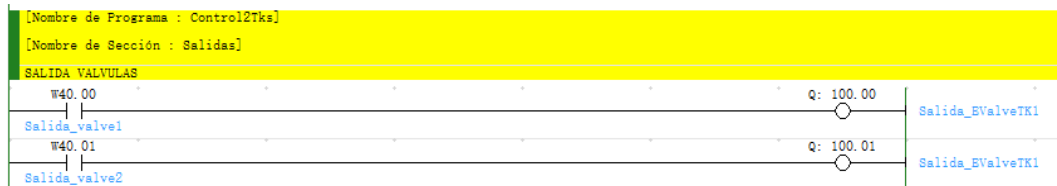


Fuente: autor, CX-Programmer

SECCIÓN SALIDAS

En esta sección, las señales digitales internas se envían a salidas físicas del PLC como se ve en la Figura 68, siendo Q100,00 y Q100,01 bobinas de salida a las válvulas de alimentación para el tanque 1 y para el tanque 2 respectivamente.

Figura 68: Sección de programa: Salida a válvulas

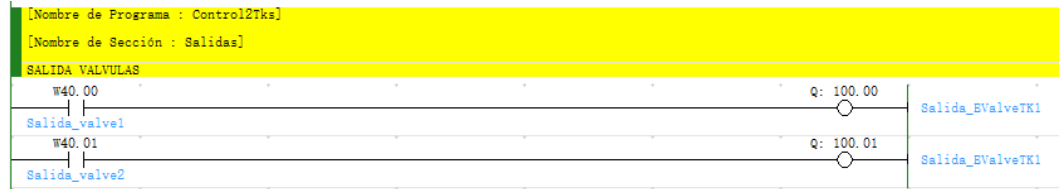


Fuente: autor, CX-Programmer

Las señales de nivel de líquido por encima del umbral superior ($w80,01$ y $w81,01$) y por debajo del umbral inferior ($w80,00$ y $w80,01$), se dirigen a variables internas ($w84,00$, $w85,00$, $w87,00$ y $w88,00$) para ser usadas por la pantalla *HMI*, tal como se muestra en la Figura 69.

Donde, se visualiza el estado del nivel respecto las referencias por medio de led's indicativos ubicados en los tanques ilustrativos de la pantalla, como se muestra en la Figura 70.

Figura 69: Sección de programa: Salidas a HMI



Fuente: autor, CX-Programmer

Figura 70: Indicador de nivel - Pantalla HMI



Fuente: autor, NB- Designer

COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS

Se establece la comunicación, entre el *computador*, el *PLC* y el *HMI* los parámetros de configuración descritos, para cargar los archivos de la programación de control y programación de la pantalla *HMI* a sus respectivos dispositivos.

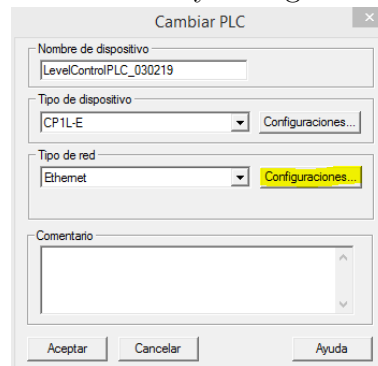
Se utiliza la dirección *IP*: 192,168,0.X. Donde, se configuran los dispositivos conectados a la misma red en el último dígito.

Siendo,

- $IP_{PLC} = 192.168.0.1$
- $IP_{HMI} = 192.168.0.2$
- $IP_{PC} = 192.168.0.3$

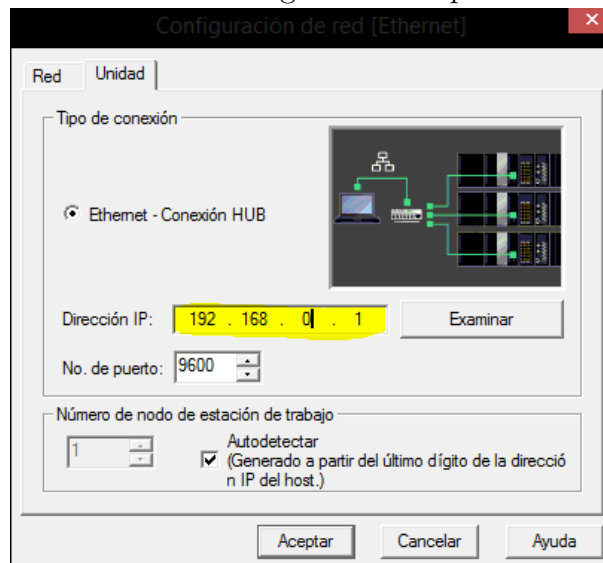
Comunicación del PLC

Figura 71: Selección de PLC y configuración de comunicación



Fuente: autor, CX-Programmer

Figura 72: Panel de configuración IP para PLC OMRON

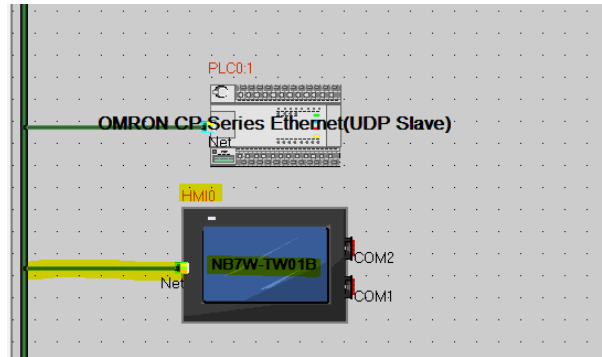


Fuente: autor, CX-Programmer

La comunicación en el PLC se configuró en la opción “cambiar configuración de comunicaciones”, mediante la configuración IP del Ethernet mostrado en la Figura 71 y la Figura 72.

Comunicación del HMI La comunicación en la pantalla HMI, se definió la configuración de la pantalla seleccionada, como el tipo de conexión Ethernet entre el HMI y el PLC y las direcciones IP respectivas mostradas en la Figura 73, Figura 74 y Figura 75.

Figura 73: Selección de pantalla para configuración



Fuente: autor, NB-Designer

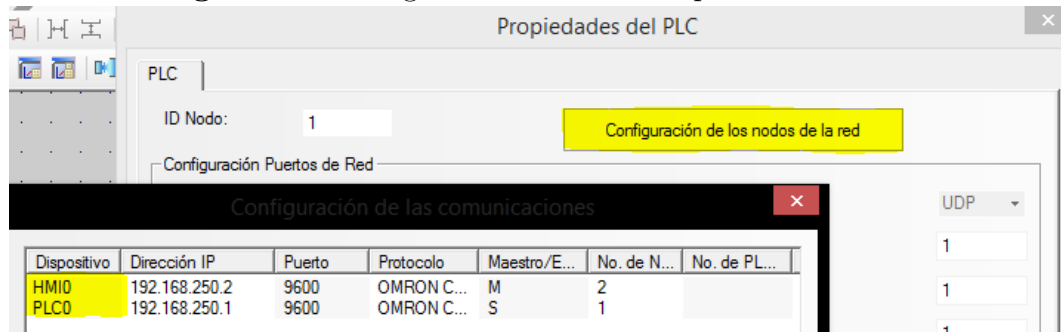
Figura 74: Panel de configuración IP en HMI OMRON

El panel de configuración IP en HMI OMRON muestra la siguiente información:

- Configuración de Red:**
 - Dirección IP: 192 . 168 . 250 . 2
 - Máscara de Subred: 255 . 255 . 255 . 0
 - Puerta de Enlace: 0 . 0 . 0 . 0
- Configuración de la Visualización:**
 - Modo de Visualización: Horizontal, Vertical
- Habilitar VNC:**
 - Contraseña de modo de monitorización: 888888
 - Contraseña de modo de operación: 888888
 - Habilitar el acceso múltiple
- Habilitar FTP:**
 - Contraseña: 888888

Fuente: autor, NB-Designer

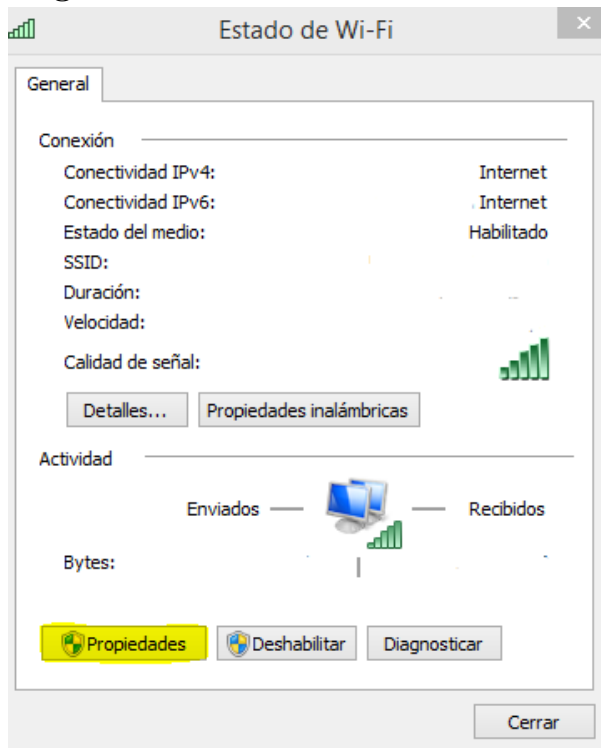
Figura 75: Configuración de IP de dispositivos en HMI



Fuente: autor, NB-Designer

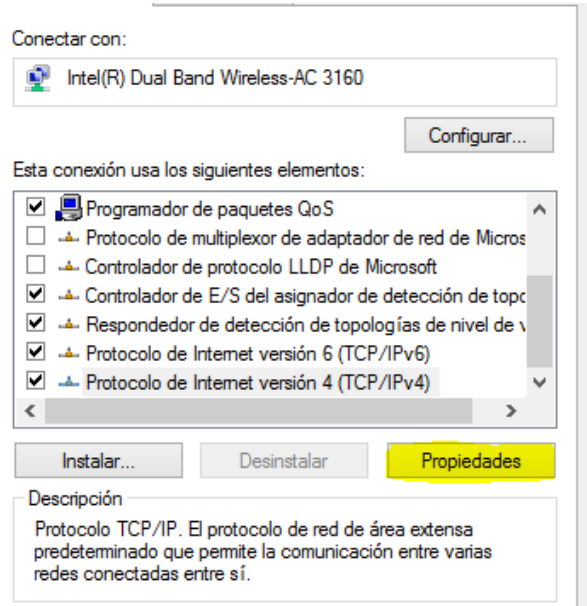
Comunicación del computador La comunicación en el computador, se configuró en el “Centro de redes y recursos compartidos”, mediante la configuración IP del Ethernet conectado, tal como se muestra en la Figura 76, Figura 77 y Figura 78.

Figura 76: Estado del Ethernet conectado



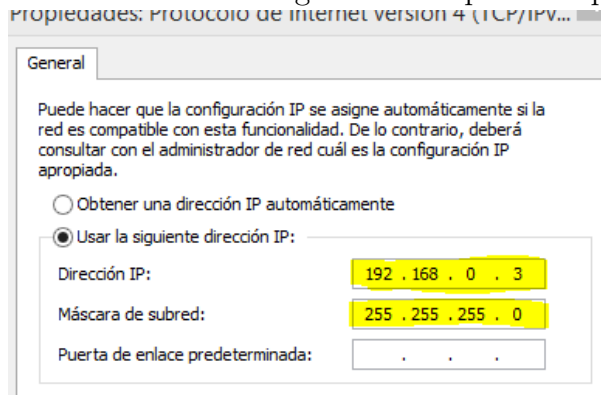
Fuente: autor

Figura 77: Panel de configuraciones de la red Ethernet en computador.



Fuente: autor

Figura 78: Panel de configuración IP para computador



Fuente: autor

8. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

En la figura 79 se muestra la interfaz gráfica diseñada e implementada en la pantalla *HMI*, la pantalla principal indica el volumen de líquido en los tanques [m^3] de modo numérico y la altura mediante una barra de modo gráfico. El tanque central, pertenece a un proceso diferente, por lo tanto no se detalla su comportamiento.

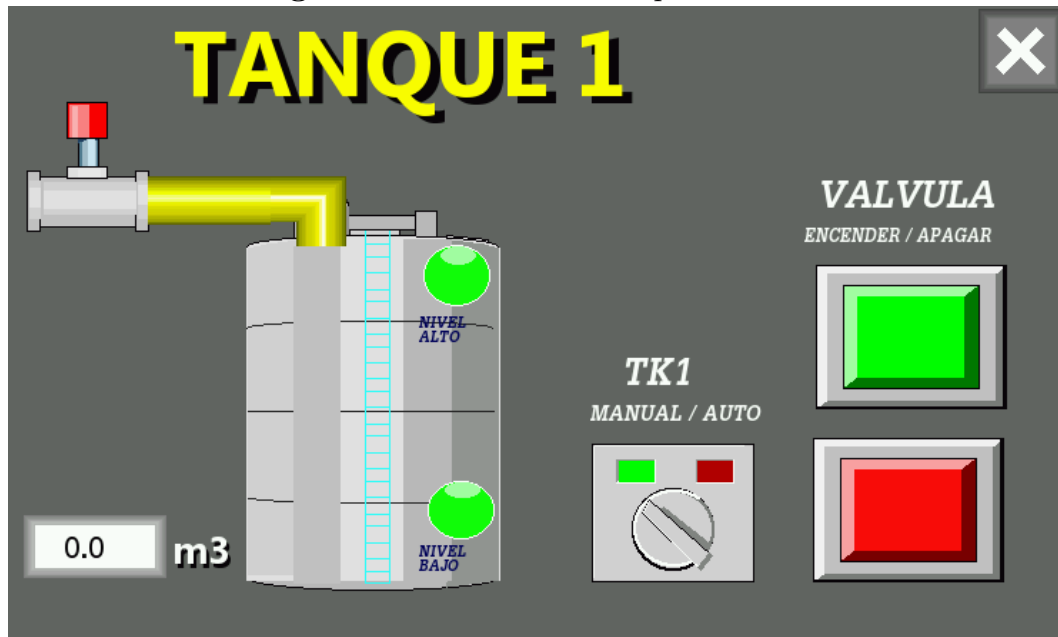
Figura 79: Pantalla Inicial HMI



Fuente: autor - NB Designer

Se visualiza los componentes de cada tanque como: indicador del estado de la válvula de alimentación, volumen actual de los tanques, altura visual en los tanques, alarmas de nivel alto y nivel bajo; además, de las opciones para el control manual o automático del sistema.

Figura 80: Pantalla del tanque 1 con accionables

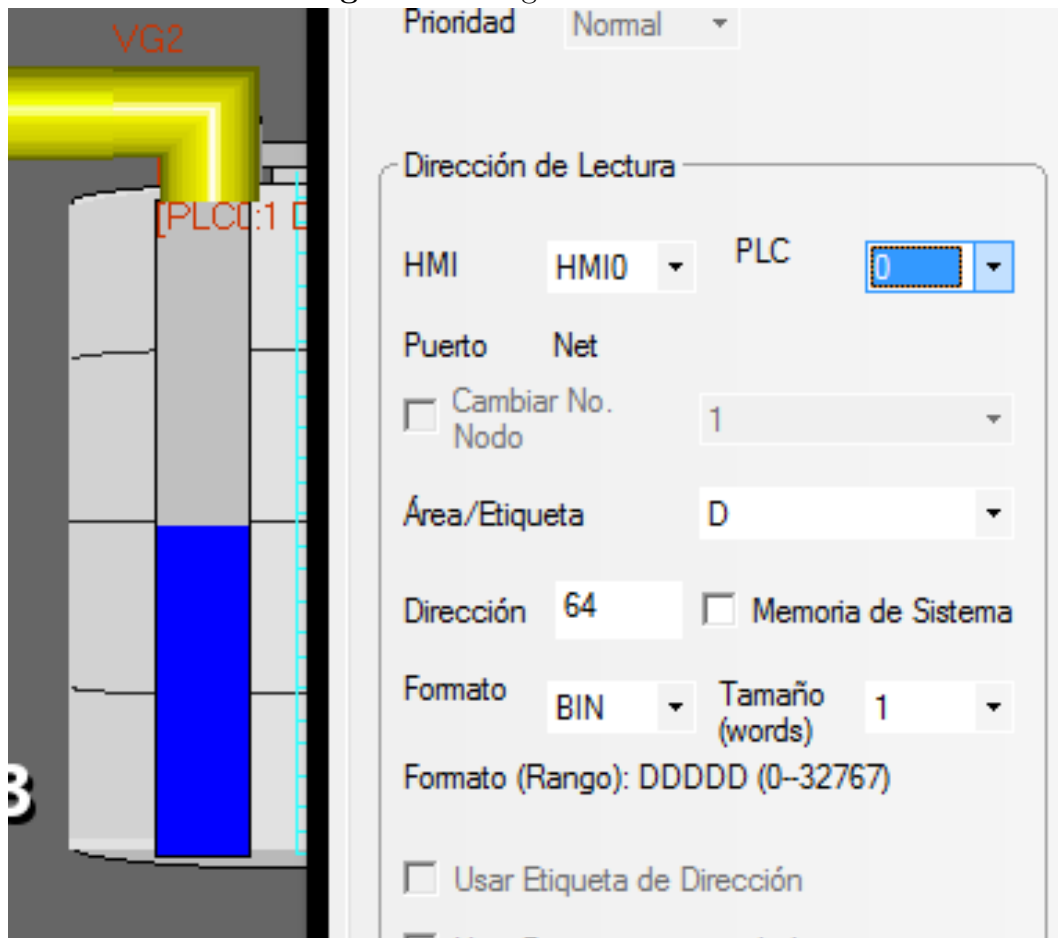


Fuente: autor - NB Designer

Cada objeto de la interfaz gráfica de usuario tiene un panel de configuración para la asignación de variables de lectura y escritura. Los objetos tienen las propiedades de lectura, escritura o ambas, dependiendo de su naturaleza.

Para leer las variables, es necesario asignar en el panel de configuración la dirección correspondiente en el PLC tal como se observa en la Figura 81. Se toma como ejemplo la lectura de datos para la barra de nivel el cual muestra la altura de líquido en el tanque, tomada de la variable (D64) la cual corresponde al valor físico de altura en el tanque.

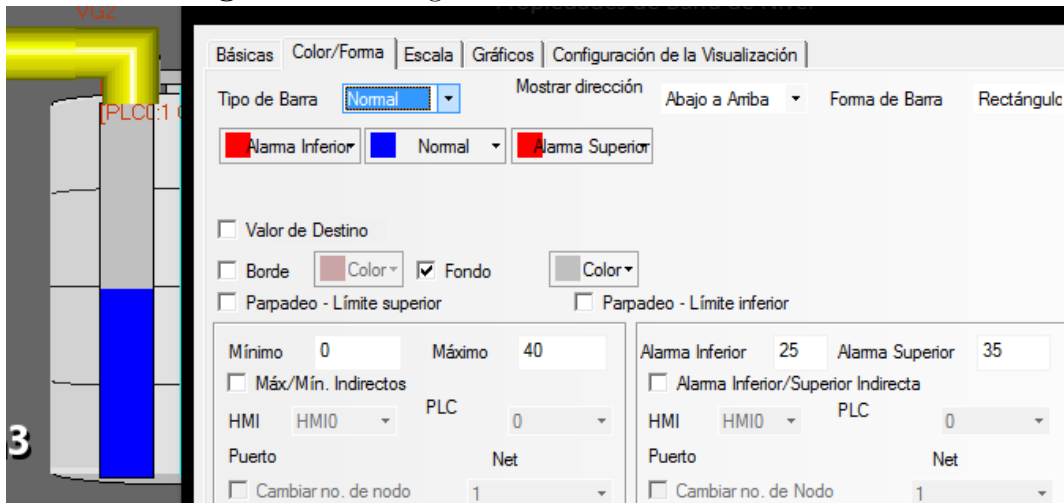
Figura 81: Asignación variable de lectura



Fuente: autor - NB Designer

La barra de nivel, cuenta con alarma visual cuando la señal del nivel del líquido no se encuentra dentro de los rangos establecidos, la cual se configura en el panel de control tal como lo muestra la Figura 82.

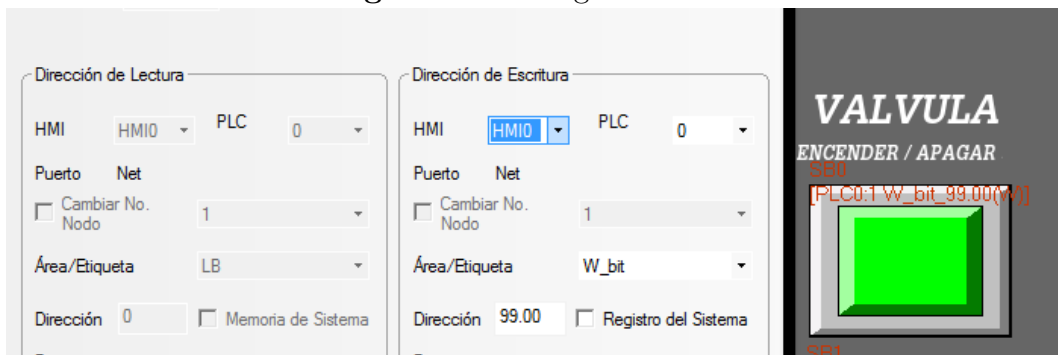
Figura 82: Configuración alarma de color en barra de nivel



Fuente: autor - NB Designer

Para escribir las variables, es necesario asignar en el panel de configuración la dirección correspondiente en el PLC tal como se observa en la Figura 83. Se toma como ejemplo el pulsador de 'Encendido de Válvula' donde convierte en '1' lógico la variable (W99.00).



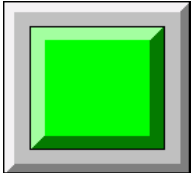
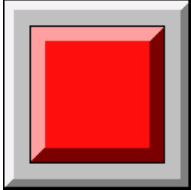
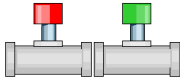
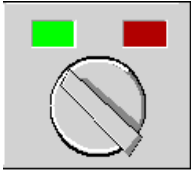


Figura 83: Configuración de escritura



Fuente: autor - NB Designer

Se describe en la siguiente tabla 3 el listado de objetos utilizados en el desarrollo de la pantalla HMI, con su respectiva variables asignada en el PLC.

Tabla 3: Lista de objetos utilizado en el desarrollo de la pantalla HMI del tanque 1

Objetos HMI	Descripción	Variable del PLC
	Indicador de Umbral Inferior	Lectura W80.00
	Indicador de Umbral Superior	Lectura W80.01
	Boton Activad Válvula	Escritura W99.00
	Boton Activad Válvula	Escritura W70.00
	Indicador de estado de válvula	Lectura Q100.00
	Interruptor de Manual Automático en pantalla	Escritura W90.00
	Barra de nivel	Lectura D64
	Visualizador Numérico	Lectura D54

Fuente: autor

9. CONCLUSIONES

El desperdicio promedio de hipoclorito en el año 2018 para el proceso de producción, tomando en cuenta el total de hipoclorito utilizado, fue de un 12 % debido a errores humanos, por medio del desarrollo del proyecto de control implementado, el desperdicio promedio del presente año disminuyó a un 4 % como se muestra en el anexo 1. A partir de estos datos, se puede evidenciar que se logró disminuir los desperdicios de hipoclorito generados por errores humanos en un 8 %.

A través del sistema de supervisión implementado mediante la pantalla HMI, no es necesario el desplazamiento del operario al área de trabajo para revisar el nivel de los tanques; sino que ahora es posible supervisar y controlar en un cuarto de control el estado del sistema de forma centralizada.

El sistema de control implementado mantiene el nivel de hipoclorito en los umbrales establecidos, lo que permitió mejorar la disponibilidad, es decir el tiempo uso efectivo del hipoclorito en el tanque sobre el tiempo de producción total, el cual será usado en los procesos subsiguientes. La disponibilidad mejoró un 5 % evaluado en los 5 meses de operación del sistema de control.

El modelo matemático tuvo un porcentaje de error de 0.43 % para el tanque 1 y 0.86 % para el tanque 2 respecto a los datos reales, lo que permitió diseñar el algoritmo de control y verificar el desempeño del sistema mediante simulación evitando el uso de recursos innecesarios en la planta real. Además las constantes de integración ζ_i obtenidas en el modelo, trabajan con las condiciones actuales de la planta.

10. TRABAJOS FUTUROS

En este momento para el control del caudal de entrada a los tanques se tienen instaladas valvulas ON-OFF; si estas se cambian por válvulas proporcionales es posible implementar sistemas de control como [Control PID] que podrían mejorar el desempeño del sistema.

Para el control del caudal de salida se propone implementar una válvula proporcional que permita regular o cerrar la salida en el momento donde el caudal de entrada es menor que el de salida, otra posible solución puede ser la instalación de un caudal de alimentación adicional.

La fabricación del tablero de control se realizó teniendo en cuenta el futuro control en tanques adicionales, se sugiere realizar la instalación de la instrumentación en los tanques de mezclado, logrando a futuro obtener un sistema scada que permita la supervisión y control del área de tanques de la planta.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] COBO, RAUL(2013), HMI, El ABC de la automatización, ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA CHILE, Tomado de: www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf
- [2] ALVAREZ BROTONS, X. (2004). Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden) (Vol. 2240). (U. P. Catalunya, Ed.) Catalunya, España: Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona - Enginyeria de Camins, Canals i Ports. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf>
- [3] BERNAL ESPITIA, F. D., ORDOÑEZ BELTRAN, J. (2015). Diseño e implementación de un sistema scada para el Control de nivel del tanque de mezcla de la planta de procesos análogos (ppa), de la udfjdc. (U. d. Caldas, Ed.) Bogota, Colombia: Repositorio Universidad distrital Francisco Jose de Caldas. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4247/1/OrdoñezBeltranJeysonAlberto2015.pdf>
- [4] CASTILLO, P. S. (MARZO DE 2016). Modelacion y control de un sistema de cuatro tanques acoplados. Obtenido de Universidad de Pirua: <http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/CONCYTEC/232/1/Tesis%20-%20Gutarra%20Castillo%20Peter.pdf>
- [5] ESQUEDA, JAIME (2002) Matlab e Interfaces Gráficas, Instituto tecnologico de ciudad madero, Noviembre Tomado de: [//ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab_seminar/docs/Matlab6xConatec.pdf](http://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab_seminar/docs/Matlab6xConatec.pdf)
- [6] INGENIERIA MECAFENIX, (2018). Que es y para que sirve un PLC?, La enciclopedia de la ingeniería. Tomado de: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/que-es-un-plc/>
- [7] NÚÑEZ ENRÍQUEZ, F. (2007). Control de movimiento empleando Labview, un enfoque didáctico. (C. UDLAP, Ed.) Puebla, Mexico: Universidad de las Américas.

Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/

[8] OGATA, K. (2003). Ingeniería de Control Moderna. Madrid, España: Pearson Educación S.A.

[9] OMEGA, (2013), ¿Qué es un sensor de nivel?, Omega España, Tomado de: <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>

[10] OMEGA, (2013), ¿Qué es un transductor de presión?, Omega España, Tomado de: <https://es.omega.com/prodinfo/transductores-de-presion.html>

[11] OMRON. (2019), CX-Programmer, OMRON Europa, Tomado de <https://industrial.omron.es/es/products/cx-programmer>

[12] PIROBLOC (2017) ¿Qué es un PID?, España, Tomado de: <https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>

[13] QUIMINET, (2011). El uso de las electroválvulas en la industria, México, Quiminet tomado de: <https://www.quiminet.com/articulos/el-uso-de-las-electrovalvulas-en-la-industria-2648462.htm>

[14] QUIPE AVILA, J. (2019). Controladores On-Off. (U. U. Nacional, Ed.) Santafé, Argentina. Obtenido de https://www.academia.edu/4968029/Control_On-Off

[15] SIEMENS, HART, Protocolo de comunicación de campo. Tomado de: <https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/es/instrumentacion-de-procesos/comunicacion-y-software/pages/hart.aspx>

[16] SIEMON. (2013), Ethernet/IP, Watertown, USA, The Siemon Company, tomado de: https://www.siemon.com/la/white_papers/03-10-13-ethernet-ip.asp

[17] SOLÓRZANO GIL, H. A. (2015). Diseño e Implementación de Interfaz Gráfica de Usuario entre el Sistema de Control de Proceso T5554 y un PLC Siemens S7-300.

Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Repositorio Universidad distrital Francisco Jose de Caldas. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7347>

[18] UNED, (2011), Controladores Industriales Inteligentes, UNED, DIEEC, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control. Tomado de www.ieec.uned.es/investigacion/dipseil/pac/archivos/informacion_de_referencia_ise6_1_2.pdf

[19] UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, (2001) Autómatas programables, Entradas y salidas, Tomado de: http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica/WebCQMH1/PAGINA%20PRINCIPAL/PLC/ESTRUCTURAS/ESTRUCTURA%20INTERNA/SECCION%20DE%20ES/seccion_de_es.htm

[20] UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA, (2014) MATLAB, Fundamento y aplicaciones. Catalunya, Tomado de: https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51427/2011/1/54513/tema5_simulink-5156.pdf.

[21] URIBE, G. F., CASTRO, E. F., ERNESTO, O. E. (2014). Controlador PID para nivel de tanque de la unidad didáctica RT614 Gunt Hamburg. Bogotá-Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander. Obtenido de https://www.academia.edu/26198071/CONTROL_DE_TANQUE_HIDRAULICO_CON_PID

[22] VARGAS GUATIVA, J. A., LÓPEZ VELÁSQUEZ, J. A., CONDE CÁRDENAS, L. (2017). Sistema de Instrumentación y Control para Tanques de Almacenamiento de Agua Potable (Vols. 1909-2458). Barranquilla, Colombia: Ingeniare. doi:10.18041/1909-2458/ingeniare.17.563

ANEXOS

ANEXO I

Certificado de desperdicios generados 2018-2019

SEÑORES
DTO. ING MECANICA
UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA

CERTIFICACIÓN

Por medio de la presente se certifica que el proyecto **DESARROLLO DE CONTROL EN LOS TANQUES ACOPLADOS DE ALMACENAMIENTO DE HIPOCLORITO** coordinado y elaborado por la estudiante **JENNIFER CAROLINA DE ANTONIO LAMPREA**, se desarrolló según los objetivos planteados y se encuentra finalizado para la fecha. El presente proyecto permitió disminuir los desperdicios de hipoclorito generados en un 8% mensual (916.16 TON/mes), siendo los desperdicios un 12% (1374.2TON/mes) del hipoclorito total utilizado en el año 2018 comparado con un desperdicio del 4% (458.08 TON/mes) del hipoclorito total utilizado en el presente año; como aumento de disponibilidad total del proceso de hipoclorito tenemos una mejora en el 5%, pasando del 89% al 94% de disponibilidad de equipos, por el sistema de control implementado y su facilidad de control para el personal operativo, reduciendo las fallas humanas.

Esta certificación se expide en Bogotá D.C. el 25 de Marzo del 2019.

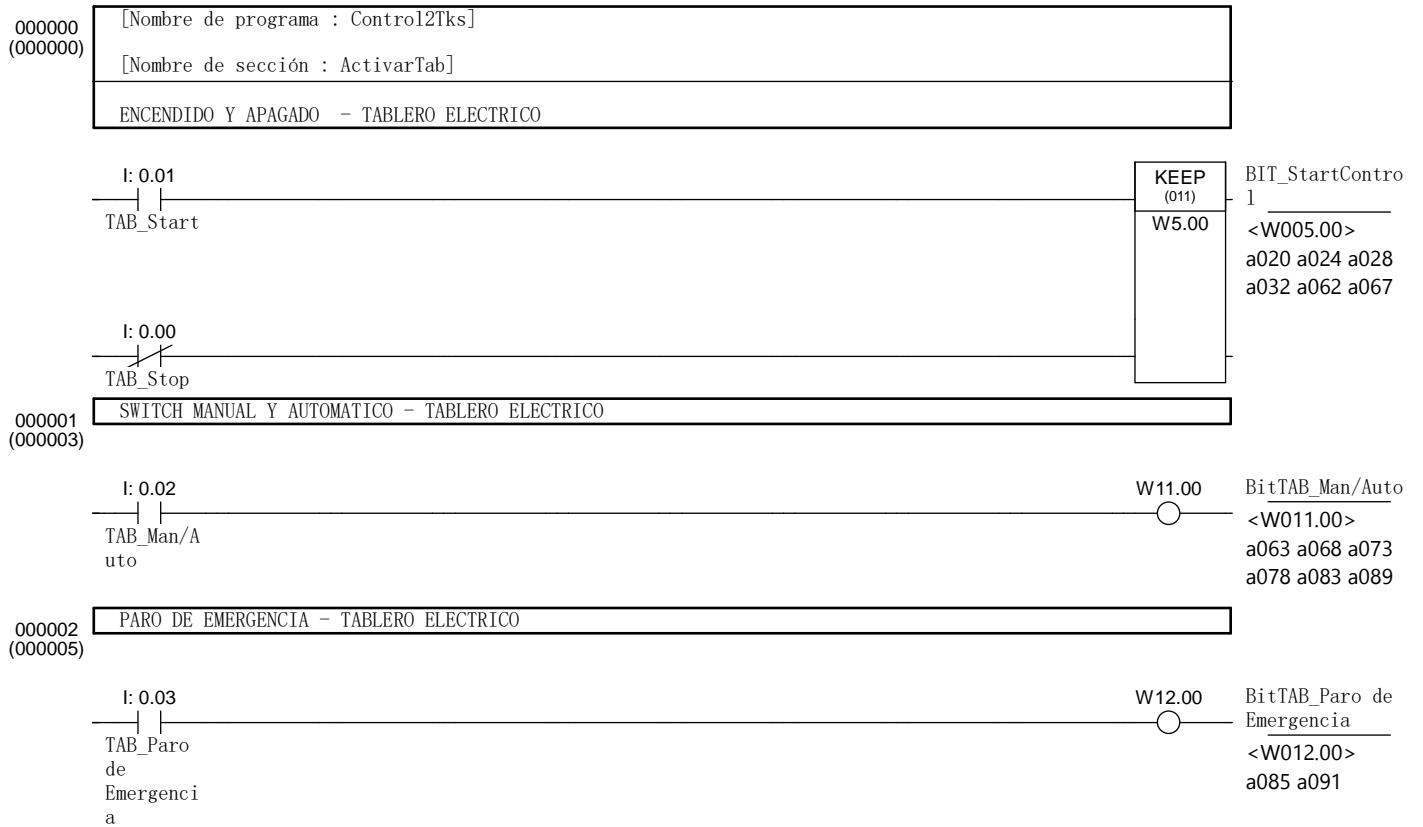
Cordialmente,



Wilson David Suárez Reina
Jefe de Mantenimiento
Plantas Cuidado de Hogar y Sal
Teléfono: +571 8833557 ext. 1432
Celular: +57 3102560193

ANEXO II

Programa de control en CX-Programmer



000000
(000008)

[Nombre de programa : Control2Tks]

[Nombre de sección : Configuracion]

Configuracion analoga de 4 a 20 mA para entradas analogas 1 y 2

CF113

| |
P_on
Indicador
de
siempre
ON

MOV (021)
#80EE
102

[OP1]
[OP2]
RegistroConfig

000000
(000011)

[Nombre de programa : Control2Tks]

[Nombre de sección : Temporizadores]

TEMPORIZADOR INICIO LECTURA DE DATOS

CF113

P_On
Indicador
de
siempre
ON

TIM

0005

#2

[OP1]
Temp_ActivarCon
trol
<T0005(bit)>
a019 a023 a027
a031 a036 a038
a041 a044 a047
a049 a052 a055
[OP2]

000001
(000013)

CONTEO ACTIVACION DE SALIDAS

CF113

P_On
Indicador
de
siempre
ON

TIM

0000

#2

[OP1]
Temp_ActivarSal
idas
<T0000(bit)>
a082 a088
[OP2]

000002
(000015)

RESET, DESDE BOTONES CONJUNTOS

I: 0.00 I: 0.01
TAB_Stop TAB_Start

TIM

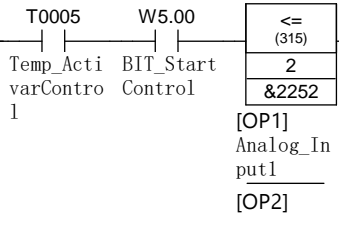
0006

#60

[OP1]
Reset_6 seg
<T0006(bit)>
a058
[OP2]

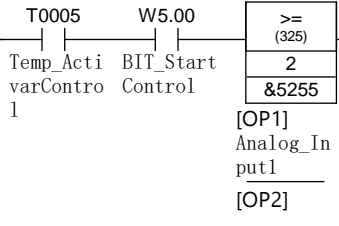
000000
(000019)

[Nombre de programa : Control2Tks]
[Nombre de sección : Comparador]
Comparador en TANQUE 1



TK1 UMBRAL INFERIOR
<W080.00>
a061 a102

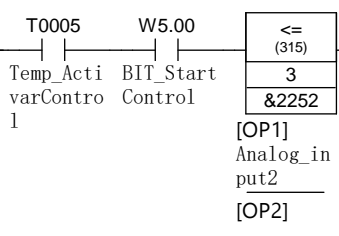
000001
(000023)



TK1 UMBRAL SUPERIOR
<W080.01>
a064 a098

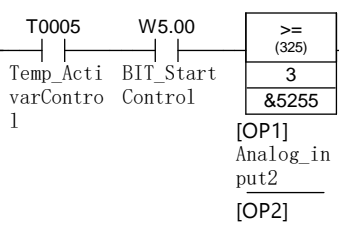
000002
(000027)

Comparador en TANQUE 2



TK2 UMBRAL INFERIOR
<W081.00>
a066 a104

000003
(000031)



TK2 UMBRAL SUPERIOR
<W081.01>
a069 a100

000000
(000036)

[Nombre de programa : Control2Tks]

[Nombre de sección : Escalado]

CONVERSION A VOLUMEN Y ALTURA - DIRECCION A PANTALLA, SENSOR 1

T0005

Temp_Acti
varContro
l

MOV
(021)
2
D2

[OP1]
Analog_Input1
<c2>
c021 c025

000001
(000038)

T0005

Temp_Acti
varContro
l

>
(320)
D2
&0

/
(430)
D2
&20
D54

[OP1]
(PLC_In, D
EC2)
Entrada
Analogica
[OP2]

[OP1]
(PLC_In, DEC2)
Entrada
Analogica
<cD00002>
c039 c040 c042
c043

000002
(000041)

T0005

Temp_Acti
varContro
l

>
(320)
D2
&0

/
(430)
D2
&2
D60

[OP1]
(PLC_In, D
EC2)
Entrada
Analogica
[OP2]

[OP1]
(PLC_In, DEC2)
Entrada
Analogica
<cD00002>
c037 c039 c040
c042

000003
(000044)

T0005

Temp_Acti
varContro
l

>
(320)
D60
&0

/
(430)
D60
&75
D64

[OP1]
Variable
Intermedi
a
[OP2]

[OP1]
Variable
Intermedia
<cD00060>
c043 c045
[OP2]
[OP3]
Altura_TK1

000004
(000047)

CONVERSION A VOLUMEN Y ALTURA - DIRECCION A PANTALLA, SENSOR 2

T0005

Temp_Acti
varContro
l

MOV
(021)
3
D4

[OP1]
Analog_input2
<c3>
c029 c033

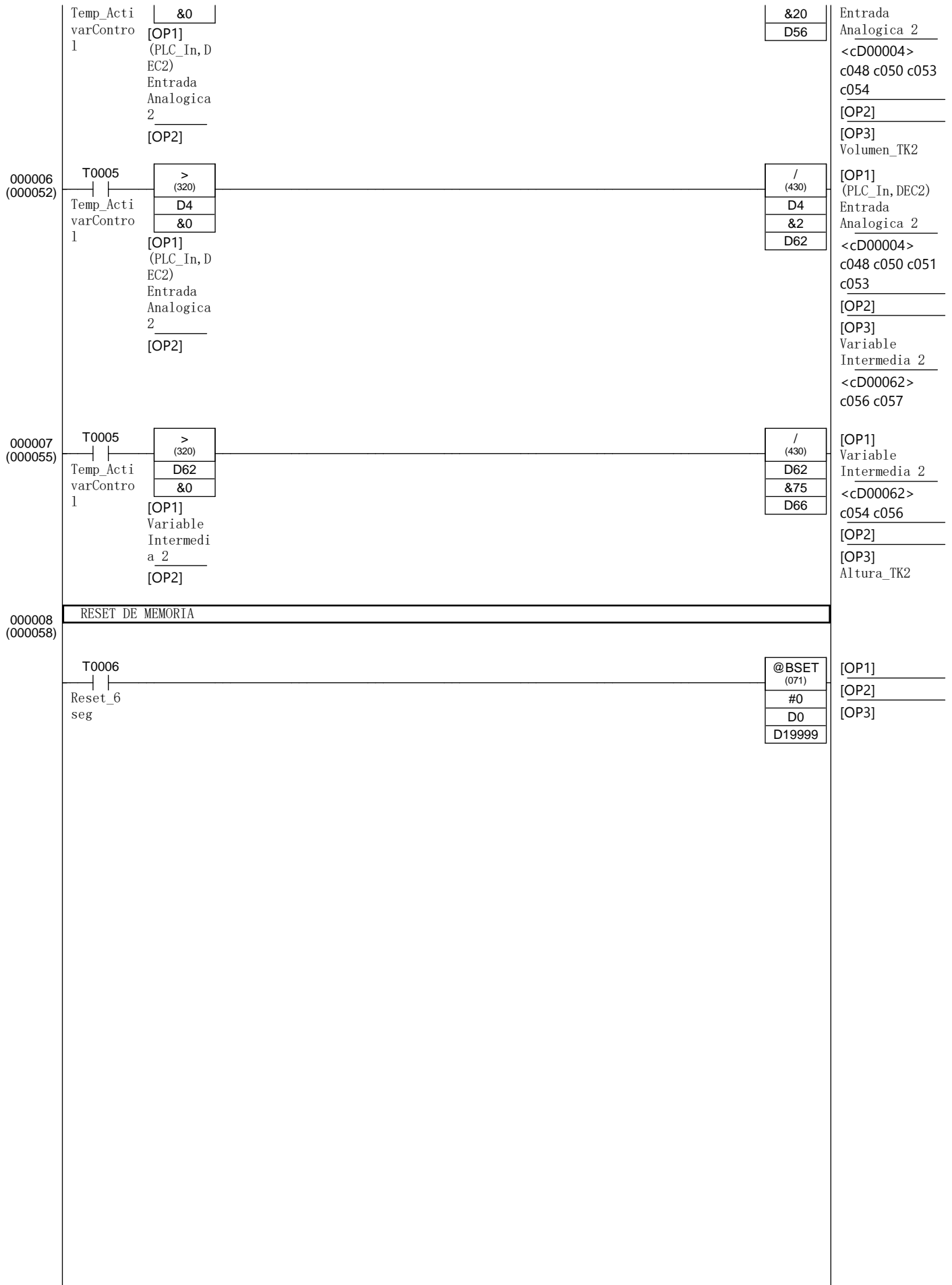
000005
(000049)

T0005

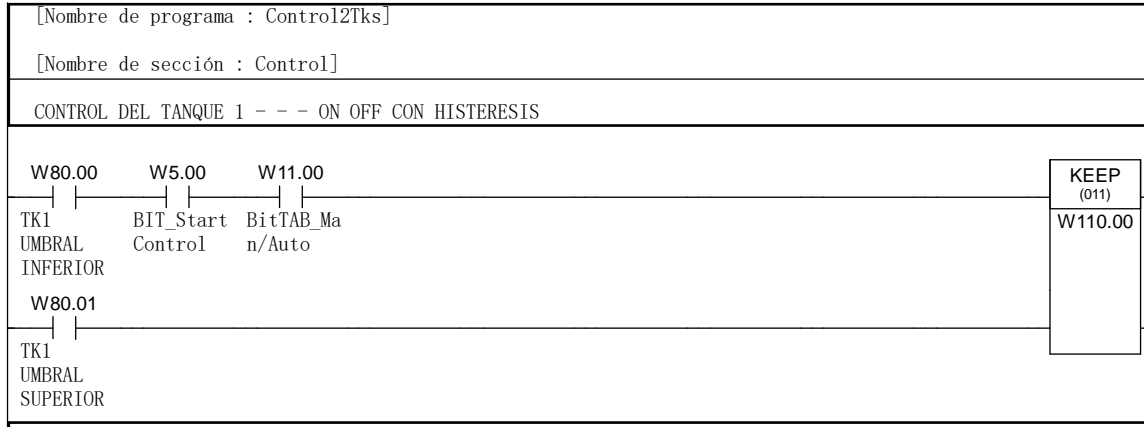
>
(320)
D4

/
(430)
D4

[OP1]
(PLC_In, DEC2)

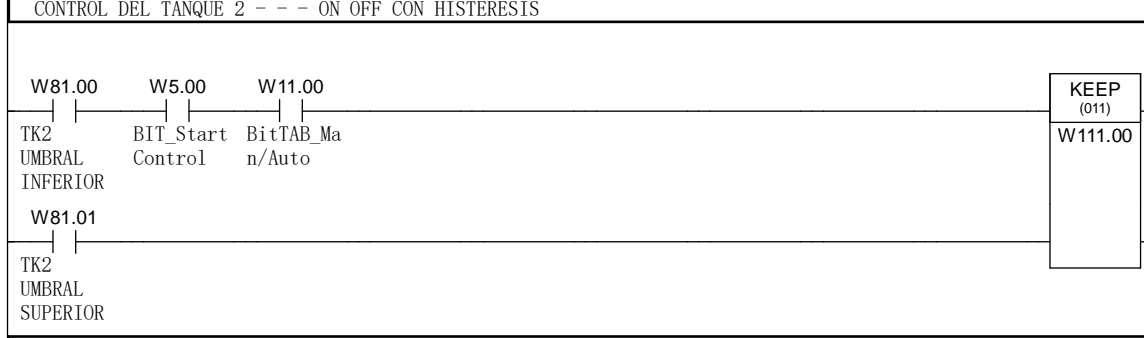


000000
(000061)



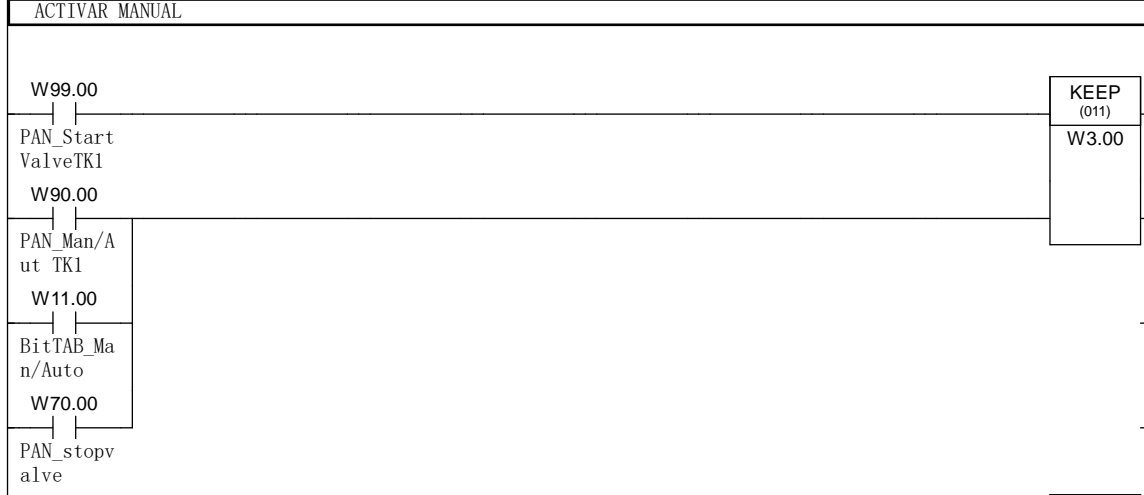
Sendout1
<W110.00>
a081

000001
(000066)



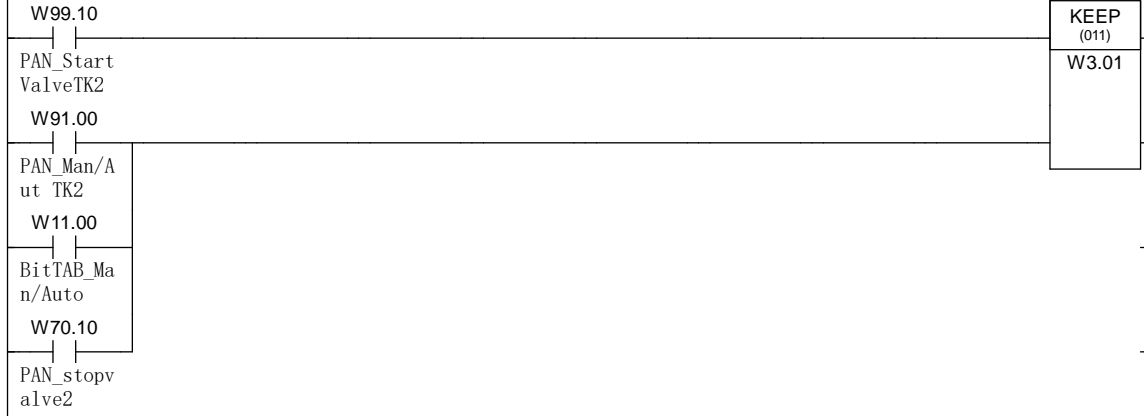
Sendout2
<W111.00>
a087

000002
(000071)



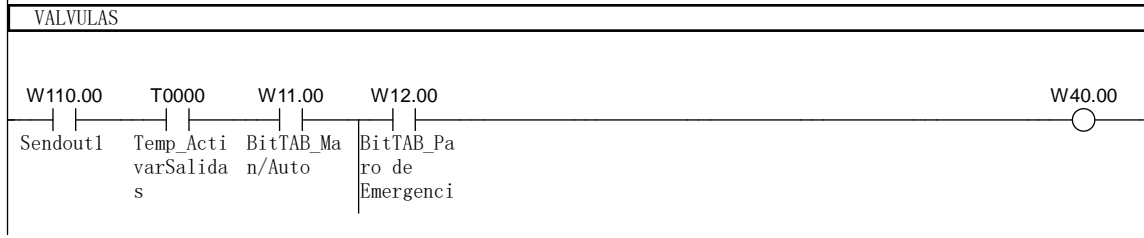
ModoManualTK1
<W003.00>
a084

000003
(000076)

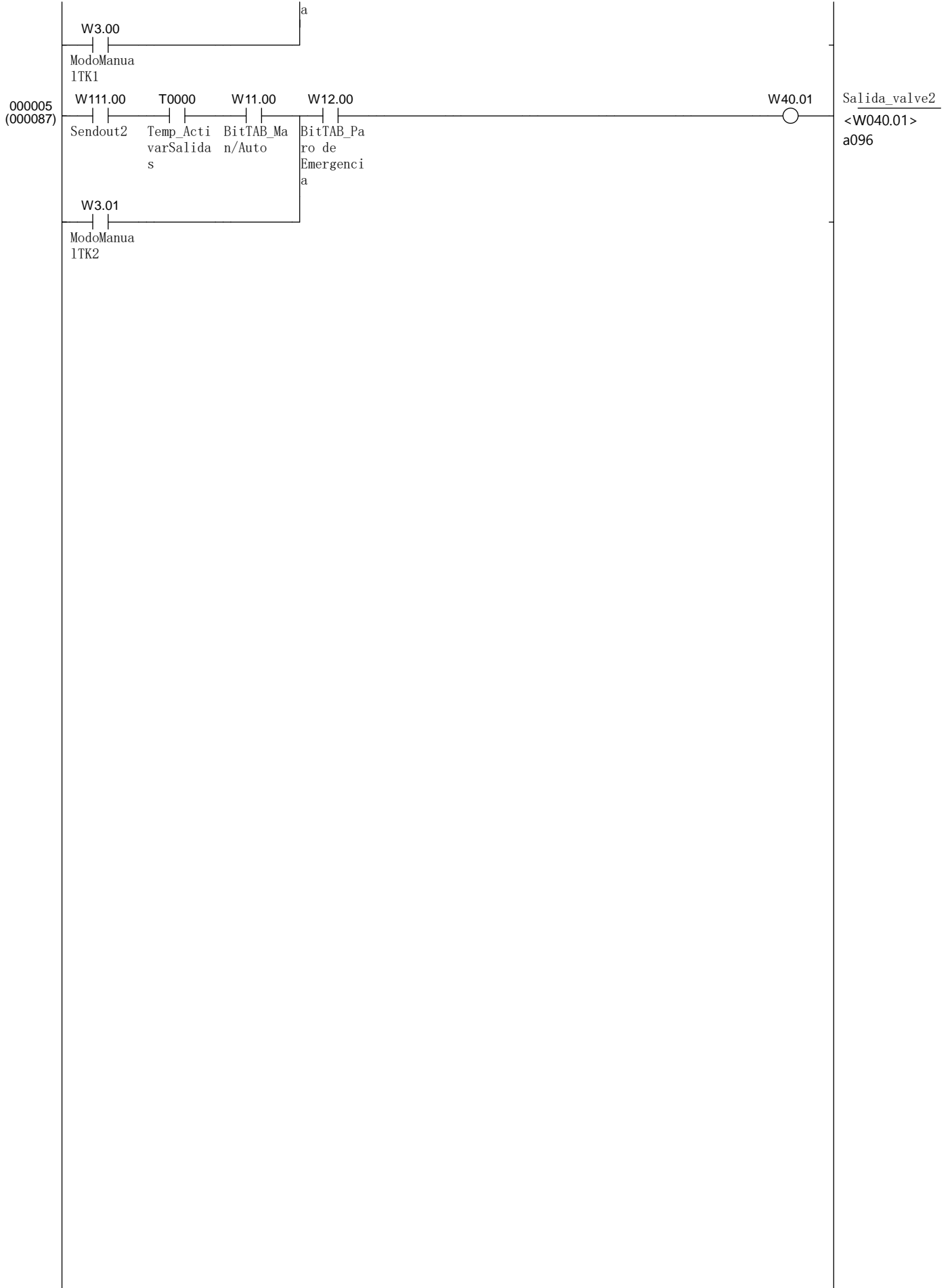


ModoManualTK2
<W003.01>
a090

000004
(000081)



Salida_valve1
<W040.00>
a094



000000 (000094)	[Nombre de programa : Control2Tks]			
	[Nombre de sección : Salidas]			
	SALIDA VALVULAS			
	W40.00		Q: 100.00	Salida_EValveTK 1
			○	
	Salida_v lve1			
000001 (000096)	W40.01		Q: 100.01	Salida_EValveTK 1
			○	
	Salida_v lve2			
000002 (000098)	SENALES VISUALES HMI			
	W80.01		W84.00	UmbralSuperior_ TK1
			○	
	TK1 UMBRAL SUPERIOR			
000003 (000100)	W81.01		W85.00	UmbralSuperior_ TK2
			○	
	TK2 UMBRAL SUPERIOR			
000004 (000102)	W80.00		W87.00	UmbralInferior_ TK1
			○	
	TK1 UMBRAL INFERIOR			
000005 (000104)	W81.00		W88.00	UmbralInferior_ TK2
			○	
	TK2 UMBRAL INFERIOR			

[Nombre de programa : Control2Tks]

[Nombre de sección : END]

000000
(000107)

END
(001)