

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica

Diseño e implementación del sistema de control y monitoreo para el proceso de potabilización del agua en el Centro de Generación Miravalles

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Andrés Sancho Salazar

Cartago, Julio de 2005

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR
ACTA DE EVALUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Miguel Hernández R.

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández C.

Profesor asesor



Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 28 de julio del 2005

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 28 de julio del 2005



Firma del autor

Andrés Sancho Salazar

Céd: 1-1036-097

Resumen

El agua potable es un recurso de vital importancia para el ser humano tanto para el desarrollo de las actividades cotidianas como labores industriales. En el Centro de Generación Miravalles (CGM) se cuenta con una planta de potabilización de agua pequeña, diseñada para abastecer las necesidades de consumo humano, servicios sanitarios, limpieza y sistema de aire acondicionado.

El sistema desde sus inicios fue planeado para ejecutarse de forma automática utilizando tecnología discreta por medio de relés y contactores, sin embargo parte del equipo sufrió múltiples desperfectos durante los años posteriores a su creación en 1994. Estos problemas llevaron a la obligación de desarrollar parte del proceso de forma manual utilizando para ello mano de obra especializada, lo cual trajo implicaciones en cuanto a costos operativos y económicos innecesarios. Se estaba desarrollando un sistema de potabilización poco confiable e ineficiente.

Para solventar este problema el CGM decidió reestructurar el proceso con la incorporación de nueva tecnología basada en la automatización centralizada por medio de la utilización de un PLC Allen Bradley SLC 500, con la posibilidad de realizar modificaciones o mejoras con suma facilidad. Esta tecnología permitió además, incorporar el proceso, al sistema de mantenimiento predictivo instalado en el CGM por medio de la utilización de herramientas Wonderware, mediante el desarrollo de una pantalla de monitoreo que, además de mostrar variables importantes del proceso, cuenta con una ventana de alarmas donde se especifica su descripción y el momento que ocurrió, permitiendo focalizar cualquier problema que se presente durante su operación, siendo una herramienta muy importante para la corrección de fallos.

Palabras claves:

PLC SLC 500, Potabilización, Dosificación, Wonderware, InTouch, RSLogix.

Abstract

Drinking water is a vital resource for the human being for the development of daily activities as much as for industrial works. The “Centro de Generación Miravalles” (CGM) has a small system for drinking water treatment, designed to supply the needs of human consumption, bathroom fittings, cleaning and air conditioning system.

From the beginning the system was designed to work automatically using discrete technology through relays and contactors, however, part of the equipment suffered multiple damages during the later years since their construction in 1994. These problems forced to develop part of the process manually by skilled workers, which brought unnecessary operative and economic costs. This was developing an untrustable and inefficient drinking water treatment system.

To solve this problem the CGM decided to restructure the process with the establishment of a new technology based on centralized automation using a PLC (Programmable Logic Controller) Allen Bradey SLC 500, with the possibility to make easy modifications or improvements. Furthermore, this technology enabled to incorporate the process to the predictive maintenance system installed in the CGM control center with Wonderware software tools. All of the process is monitored from a screen in the control center located in the main building of CGM. This screen shows important variables for the process in dynamic drawings, and has an alarm window that describes the problem and the moment it occurred. This is a valuable tool that allows focusing any problem occurring during the process and helps correct it faster.

Keywords:

PLC SLC 500, Drinking Water treatment, to dose, Wonderware, InTouch, RSLogix.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1: Introducción.....	14
1.1 Problema existente e importancia de su solución	14
1.2 Solución seleccionada.....	17
CAPITULO 2: Meta y objetivos	18
2.1 Meta	18
2.2 Objetivo general	18
2.3 Objetivos Específicos Automatización y Control	18
2.3.1 Objetivos de hardware	18
2.3.2 Objetivos de software.....	18
2.3.3 Objetivos de documentación	19
2.3.4 Objetivos de implementación	19
2.4 Objetivos Específicos Comunicación y Monitoreo.....	19
2.4.1 Objetivos de hardware	19
2.4.2 Objetivos de software.....	19
2.4.3 Objetivos de documentación	19
2.4.4 Objetivos de implementación	20
CAPITULO 3: Marco teórico	21
3.1 Descripción del sistema o proceso por mejorar	21
3.2 Antecedentes Bibliográficos	27
3.2.1 Automatización y control	27
3.2.2 Comunicación y monitoreo.....	29
3.3 Parámetros para la calidad del agua potable.....	32
3.3.1 Cloro	32
3.3.2 pH	32
3.3.3 Turbidez	33
3.3.4 Conductividad	34

3.4 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.....	36
3.4.1 Filtro de lecho múltiple	36
3.4.2 Capacidad de control de las bombas de dosificación	39
3.4.3 Instrucción proporcional integral derivativa	41
3.4.4 Método empírico de sintonización para PID.....	43
CAPITULO 4: Procedimiento Metodológico	47
4.1 Obtención y análisis de información.....	48
4.2 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	49
4.3 Implementación de la solución	50
4.4 Reevaluación y rediseño	55
CAPITULO 5: Descripción detallada de la solución	56
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	59
5.1.1 Automatización y Control	59
5.1.2 Comunicación y monitoreo.....	60
5.2 Descripción de hardware en Automatización y control.....	61
5.2.1 Diseño de paneles de control Principal y Local.....	61
5.2.2 Diseño control del sistema de dosificación	67
5.2.3 Diseño del control del filtro de lecho múltiple	69
5.2.4 Diseño y control del tanque hidroneumático	71
5.3 Descripción de hardware en Comunicación y monitoreo	72
5.4 Descripción de software en Automatización y Control	75
5.4.1 Dosificación.....	76
5.4.2 Control de nivel del tanque de agua cruda.....	97
5.4.3 Control del Filtro de Lecho Múltiple (FLM)	102
5.4.4 Control del nivel del tanque de agua potable	104
5.4.5 Control de nivel del tanque hidroneumático	109
5.5 Descripción de software en Comunicación y Monitoreo.....	113
5.5.1 Simbología	114
5.5.2 Ventanas Auxiliares	115

5.5.3 Alarmas.....	115
CAPITULO 6: Análisis de Resultados.....	117
6.1 Automatización y Control	117
6.2 Comunicación y Monitoreo	126
CAPITULO 7: Conclusiones y recomendaciones.....	127
7.1 Conclusiones.....	127
7.2 Recomendaciones.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama general del proceso de potabilización	15
Figura 3.1 Ingreso de agua al tanque de agua cruda en su antigua configuración ...	22
Figura 3.2 Dosificación de químicos en el tanque de agua cruda en su antigua configuración.....	23
Figura 3.3 Sistema de potabilización en su antigua configuración.....	25
Figura 3.4 Esquema general del proceso de potabilización en su configuración anterior.....	26
Figura 3.5 Dispositivo AIC+.....	31
Figura 3.6 Ubicación de las compuestas de la válvula multipuerta en el modo de servicio.....	37
Figura 3.7 Ubicación de las compuestas de la válvula multipuerta en el modo de retrolavado	38
Figura 3.8 Válvula multipuerta y “timer” del filtro de lecho múltiple	38
Figura 3.9 Porcentaje de variación de la velocidad con respecto a la señal de entrada de 4 a 20 mA para las bombas Pulsatron	40
Figura 3.10 Porcentaje de variación de la velocidad con respecto a la señal de entrada de 4 a 20 mA para las bombas Milton Roy	41
Figura 3.11 Ejemplo de control de nivel de un fluido a lazo cerrado con PID	42
Figura 3.12 Respuesta al escalón típico por el método de curva de reacción en lazo abierto de la planta.....	44
Figura 3.13 Respuesta a lazo cerrado de la planta genérica con PID ajustado de la curva de reacción vía Ziegler-Nichols	45
Figura 5.1 Distribución del sistema de potabilización en su configuración actual	58
Figura 5.2 Distribución de las ranuras en el PLC del sistema de potabilización	62
Figura 5.3 Distribución de luces y botones en el panel de control principal	65
Figura 5.4 Distribución de luces y botones en el panel de control local	66

Figura 5.5 Distribución de los tanques de dosificación de químicos, entrada del agua y bombas dosificadoras, estructura del edificio general (elaborado por Ing. Jorge Vindas).....	68
Figura 5.6 Nuevo sistema de control para la válvula multipuerta del filtro de lecho múltiple.....	70
Figura 5.7 Comunicación punto a punto entre PLC y servidor Mira2.....	72
Figura 5.8 Configuración de colores en conector RJ-45.....	73
Figura 5.9 Circuito de conexión del sistema de comunicación punto a punto.....	74
Figura 5.10 Módulos del sistema de dosificación.....	75
Figura 5.11 Sistema de dosificación a lazo abierto.....	77
Figura 5.12 Obtención de la relación del flujo de dosificación versus flujo de entrada.....	77
Figura 5.13 Variación del flujo de dosificación versus el flujo de entrada para la bomba de sulfato de aluminio.....	80
Figura 5.14 Variación del flujo de dosificación versus el flujo de entrada para la bomba de Hipoclorito de calcio.....	80
Figura 5.15 Diagrama de flujo para el control de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio.....	82
Figura 5.16 Sistema de control de pH a lazo cerrado.....	83
Figura 5.17 Obtención de parámetros para el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.....	86
Figura 5.18 Parámetros de ajuste para el PID.....	87
Figura 5.19 Trayectoria aproximada mediante la parametrización OE con un 90% de ajuste.....	88
Figura 5.20 Lugar de las raíces para la planta $G(z)$	89
Figura 5.21 Lugar de las raíces con compensador.....	90
Figura 5.22 Ampliación del lugar geométrico de las raíces.....	91
Figura 5.23 Respuesta ante un escalón unitario para la planta con compensador...	92
Figura 5.24 Diagrama de flujo para el control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio.....	94

Figura 5.25 Diagrama de flujo para el control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio (continuación)	95
Figura 5.26 Diagrama de flujo para el control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio (continuación)	96
Figura 5.27 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua cruda....	99
Figura 5.28 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua cruda (continuación).....	100
Figura 5.29 Ubicación del sensor de nivel capacitivo en el tanque de agua cruda .	101
Figura 5.30 Diagrama de flujo para el control del filtro de lecho múltiple	103
Figura 5.31 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua potable	106
Figura 5.32 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua potable (continuación).....	107
Figura 5.33 Ubicación del sensor de nivel capacitivo en el tanque de agua Potable	108
Figura 5.34 Diagrama de flujo para el control de nivel del tanque hidroneumático .	111
Figura 5.35 Diagrama de flujo para el control de nivel del tanque hidroneumático (continuación).....	112
Figura 5.36 Protocolos de transmisión en el sistema de comunicación	113
Figura 5.37 Pantalla del sistema de potabilización	114
Figura 5.38 Alarmas y eventos durante el proceso de prueba.....	116
Figura 6.1 Nuevo sistema de válvulas para el control del filtro de lecho múltiple....	117
Figura 6.2 Sistema de dosificación en línea.....	118
Figura 6.3 Panel Loca junto a los medidores de flujo y pH	119
Figura 6.4 Ubicación de la sección de filtrado y distribución	119
Figura 6.5 Panel Principal y alambrado interno.....	120
Figura 6.6 Circuito de medición para la obtención del valor del pH en la línea de entrada y velocidad de bombeo en la bomba de dosificación de carbonato de sodio	121

Figura 6.7 Respuesta del pH ante un escalón de velocidad de la bomba de dosificación de carbonato de sodio	122
Figura 6.8 Velocidad de la bomba y valor de pH obtenidos después de 6 minutos de iniciado el proceso de dosificación.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Función de los principales elementos del procesamiento de agua	21
Tabla 3.2	Módulos que conforman el PLC	27
Tabla 3.3	Opciones de conexión física del procesador 5/03	29
Tabla 3.4	Parámetros organolépticos determinantes en la calidad del agua	34
Tabla 3.5	Algunos parámetros físico-químicos determinantes en la calidad del agua	35
Tabla 3.6	Capacidades máximas de bombeo de las bombas de dosificación	39
Tabla 3.7	Constantes de ganancia estándar para la ecuación del PID	43
Tabla 3.8	Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols	44
Tabla 3.9	Efecto del incremento de las ganancias de un controlador PID	46
Tabla 5.1	Ubicación de módulos por ranura	63
Tabla 5.2	Estado de los diafragmas en los diferentes ciclos de acondicionamiento	69
Tabla 5.3	Estado de los solenoides en los diferentes ciclos de acondicionamiento	69
Tabla 5.4	Criterios tomados para el cálculo de la concentración en los tanques de dosificación	79
Tabla 5.5	Obtención de la ecuación final para el cálculo del flujo de dosificación versus el flujo de entrada	79
Tabla 5.6	Parámetros del método de la curva de reacción	85
Tabla 5.7	Parámetros de sintonización para el PID	85
Tabla 6.1	Tiempos de establecimiento y sobre-impulso medidos a partir de un pH de 4.5	123
Tabla 6.2	Parámetros de potabilidad realizadas en el tanque de agua potable durante el mes de febrero del 2005	125
Tabla 6.3	Porcentaje de error de paquetes de datos recibidos en el mes de febrero del 2005	126

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

La idea de la construcción de la planta de potabilización nace como parte del proyecto para el abastecimiento de agua de Miravalles 1 bajo el nombre de: Planta de Tratamiento de Agua para Remover Hierro. Esta fue prevista para suplir un buen abastecimiento de agua en la planta, debido a que la cañería de agua potable local era insuficiente para las necesidades de la misma. Dentro del presenta capitulo se hace referencia al problema y se da un enfoque generalizado de la solución obtenida.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Casa de Aguas en el Centro de Generación Miravalles (CGM), es una planta de potabilización de agua pequeña, dispuesta para abastecer las necesidades de consumo de agua del sistema de aire acondicionado, consumo humano, servicios sanitarios, y limpieza.

En la Figura 1.1 se muestra un diagrama general del proceso de captación y potabilización del agua.

Inicialmente el agua es tomada del río conocido con el nombre de “Cabromuco” en las montañas colindantes al volcán Miravalles (este río se caracteriza por una alta concentración en hierro). Esta agua es trasladada por medio de una tubería a un tanque de captación y de allí al CGM donde el agua es procesada mediante dosificación y filtrado, para luego ser utilizada como agua de servicio.

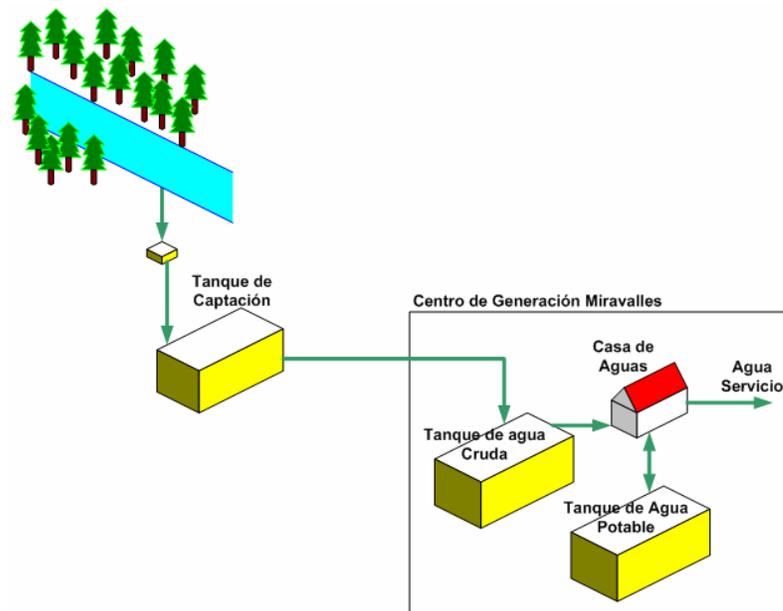


Figura 1.1 Diagrama general del proceso de potabilización

Este proceso de potabilización fue concebido para trabajar de forma automática cuando se finalizó la construcción de la planta Miravalles I en 1994, sin embargo, sufrió múltiples modificaciones, debido principalmente a un mal diseño del sistema y en consecuencia a desperfectos en los equipos que forman parte del proceso. A partir de esto, se requirió de la utilización de mano de obra especializada para desarrollar parte del proceso de potabilización, que debía realizarse de forma automática. Esto trajo implicaciones en cuanto a costos operativos y económicos innecesarios. Se estaba desarrollando un sistema de potabilización poco confiable e ineficiente.

Desperfectos

Dentro de los principales desperfectos sufridos desde el inicio de su construcción hasta el comienzo del proyecto de graduación, se pueden citar los siguientes:

- Los sensores originales de nivel de agua para los tanques se oxidaron, por lo que fueron sustituidos por sensores ultrasónicos de los cuales solo funcionaba uno.
- Finalizado el proceso, el agua salía sucia por lo que se incorpora sulfato de aluminio en el tratamiento, el cual mejoro sustancialmente la calidad del agua, reduciendo su turbidez.
- La aplicación de las dosificaciones se hacía directamente a la cañería de agua cruda (dosificación en línea) pero debido al largo trayecto que debían recorrer los químicos, se producían presiones elevadas y obstrucciones en la tubería, por lo que se recurrió a dosificar directamente en el tanque de agua cruda.
- Se contaba con la utilización de una válvula motorizada que permitía el paso de agua cruda al tanque, pero esta no estaba diseñada para trabajar es las condiciones en las que se encontraba, por lo que se dañó y se sustituyó por una válvula de apertura manual.
- Se utilizaba un controlador de pH el cual regulaba la dosificación de carbonato de sodio por medio de un sensor de pH. Este sistema dejo de tener valides debido a que el controlador se quemó por una sobrecarga provocada por un rayo.

1.2 Solución seleccionada

Parte de la propuesta de solución fue desocupar el edificio donde se encontraba el sistema de potabilización y ubicar el proceso en dos secciones por medio de la construcción de nuevos edificios, uno donde se albergó el sistema de dosificación y otro donde se encuentra el sistema de bombeo y distribución. Esta propuesta surgió a raíz de las modificaciones que se planearon para hacer un sistema de dosificación en línea, eliminando así múltiples desventajas del sistema anterior.

Para desarrollar esta propuesta se requirió de la incorporación de nueva tecnología mediante el control centralizado, por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC) estilo modular SLC 500 de la marca Allen Bradley, además de la adquisición de nuevo equipo para hacer del sistema un proceso automático.

Se incorporó nuevas tendencias en el monitoreo HMI (*Human Machine Interface*) por medio de herramientas de Wonderware, que forman parte del Sistema de Mantenimiento Predictivo en el CGM.

Esto creó un sistema más robusto y versátil para el usuario, tanto para la predicción y prevención, como la inminente corrección de alguna posible falla, lo cual concuerda dentro de las políticas que impulsa el CGM.

Dentro de las principales facilidades que brinda el sistema se encuentran:

- **Proceso más preciso:** garantiza que el proceso se repita una y otra vez de la misma forma.
- **Versatilidad:** fáciles modificaciones o mejoras al proceso gracias al control centralizado en el PLC.
- **Rápida detección de fallas:** el sistema de monitoreo permite focalizar el punto de una falla con mayor facilidad.

CAPITULO 2: META Y OBJETIVOS

2.1 Meta

Obtener un sistema de potabilización automatizado, incorporado al programa de mantenimiento preventivo y correctivo que impulsa el Centro de Generación Miravalles.

2.2 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo para el proceso de potabilización del agua en el Centro de Generación Miravalles.

2.3 Objetivos Específicos Automatización y Control

2.3.1 Objetivos de hardware

- a) Estructurar la ubicación de las luces y botones necesarios en los paneles principal y local utilizado por los operarios del proceso
- b) Sustituir el “Timer” mecánico del filtro de lecho múltiple por un sistema de electro-válvulas controladas por el PLC
- c) Utilizar nuevos sensores en el tanque hidroneumático para facilitar su incorporación al sistema de monitoreo
- d) Incorporar el PLC SLC 500 al nuevo sistema de potabilización mediante el estudio de las características de hardware, tanto del PLC como de los nuevos sensores

2.3.2 Objetivos de software

- a) Calcular los parámetros del PID, necesarios para el control del pH por medio de la bomba de dosificación de carbonato de sodio

- b) Obtener un sistema de control lineal a lazo abierto, para la dosificación de sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio
- c) Establecer los diagramas de flujo de programación para cada una de las etapas dentro del proceso de potabilización
- d) Diseñar el programa escalera necesario para controlar el proceso de potabilización

2.3.3 Objetivos de documentación

Desarrollar un manual de operación y mantenimiento donde se especifique las características de funcionamiento del sistema de potabilización

2.3.4 Objetivos de implementación

- a) Prueba del programa por medio de un prototipo experimental
- b) Realizar la puesta en marcha y el correcto funcionamiento por módulos
- c) Verificar el correcto funcionamiento del sistema

2.4 Objetivos Específicos Comunicación y Monitoreo

2.4.1 Objetivos de hardware

Desarrollar la comunicación mediante el protocolo RS-485 entre el PLC y un servidor remoto

2.4.2 Objetivos de software

Desarrollar una pantalla de visualización (mímico) del proceso de potabilización en la herramienta In Touch del sistema Wonderware

2.4.3 Objetivos de documentación

Desarrollar un manual de operación e implementación con las características de comunicación entre el PLC y Wonderware

2.4.4 Objetivos de implementación

- a) Establecer comunicación entre PLC y servidor
- b) Puesta en marcha y revisión del sistema de monitoreo

CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Descripción del sistema o proceso por mejorar

Antes de proceder a la descripción del proceso por mejorar, es importante conocer de antemano la función primordial de los principales elementos que conforman el proceso de potabilización, estos se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Función de los principales elementos del procesamiento de agua

Elemento	Función
Tanque de agua cruda	Eliminar el color, las bacterias, los sedimentos gruesos y el hierro soluble para el proceso de filtrado.
Tanque de agua potable	Contener al agua potable.
Filtro de lecho múltiple	Eliminar los sólidos suspendidos más finos.
Tanque hidroneumático	Dar presión al agua para servicio.
Bombas de agua cruda	Enviar ésta al filtro y al tanque de agua potable.
Bombas de agua de servicio	Enviar el agua al tanque de presión.
Bombas de dosificación de: hipoclorito de calcio, carbonato de sodio y sulfato de aluminio	Desinfectar, neutralizar y acondicionar el agua.
Tanques de químicos	Contener los químicos a dosificar.
Sistema de tuberías	Distribución del agua de proceso.
Redes eléctricas y de control por medio de contactores y reles	Realizar parte del proceso automatizado

Con base en la Figura 3.3, a continuación se describe el procedimiento establecido previo a la implementación del proyecto:

El agua cruda proveniente del tanque de captación se le regulaba el paso por medio de una llave mariposa de control manual (ver Figura 3.1), la cual los operadores abrían y cerraban dependiendo del nivel del tanque que es verificado manualmente por medio de un indicador visual.



Figura 3.1 Ingreso de agua al tanque de agua cruda en su antigua configuración

Una vez que empezaba el llenado del tanque de agua cruda los operadores activaban las bombas dosificadoras de carbonato de sodio, hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio, desde un panel de control ubicado en el mismo cuarto donde se

encontraban los tanques de químicos. Estas dosificaciones eran trasladadas aproximadamente 25 metros por medio de tuberías hacia la misma abertura por donde ingresa el agua cruda, después de la llave mariposa, procurando que las dosificaciones se mezclen con el agua cuando ingresan al tanque (ver Figura 3.2).



Figura 3.2 Dosificación de químicos en el tanque de agua cruda en su antigua configuración

Luego, el agua del tanque de agua cruda pasa por un filtro de presión de arena o filtro de lecho múltiple, con la ayuda de las bombas de agua cruda y de allí hacia el tanque de agua potable. Estas bombas eran activadas cuando el nivel del tanque de agua potable alcanzaba aproximadamente un metro, por medio de un sensor de nivel ultrasónico que mediante una lógica discreta activaba las bombas.

En esta parte del proceso podía ocurrir que cuando se estaba llenando el tanque de agua cruda, el sensor de nivel ultrasónico activara el sistema de llenado del tanque de agua potable, provocando una circulación continua del agua reduciendo el tiempo

residencia de los químicos en el tanque de agua cruda, lo que ocasionaba poca eficiencia en el proceso.

El filtro de arena tiene un proceso de lavado interno automático dentro de su operación, el cual se hacía a diario a una hora prefijada en el “timer” mecánico, que se encontraba en la parte superior del filtro. Para este lavado interno se utiliza la bomba de retrolavado, este se encarga de “enjuagar” el filtro por dentro con agua potable, según un ciclo en el que se encuentre.

Por ultimo, del tanque de agua potable se pasaba al tanque hidroneumático, el cual debe tener cierto nivel de agua para mantener la presión en las cañerías de servicio. Este sistema funcionaba con dos sensores de nivel alto y bajo, y un sensor de presión de aire, las cuales por medio de contactores accionaban las bombas de servicio cuando el sensor de nivel bajo lo indicaba.

Las bombas de agua cruda y de servicio se encuentran en pares activándose en forma alternada cuando sean requeridas, reduciendo el riesgo de producirse desperfectos por fatiga.

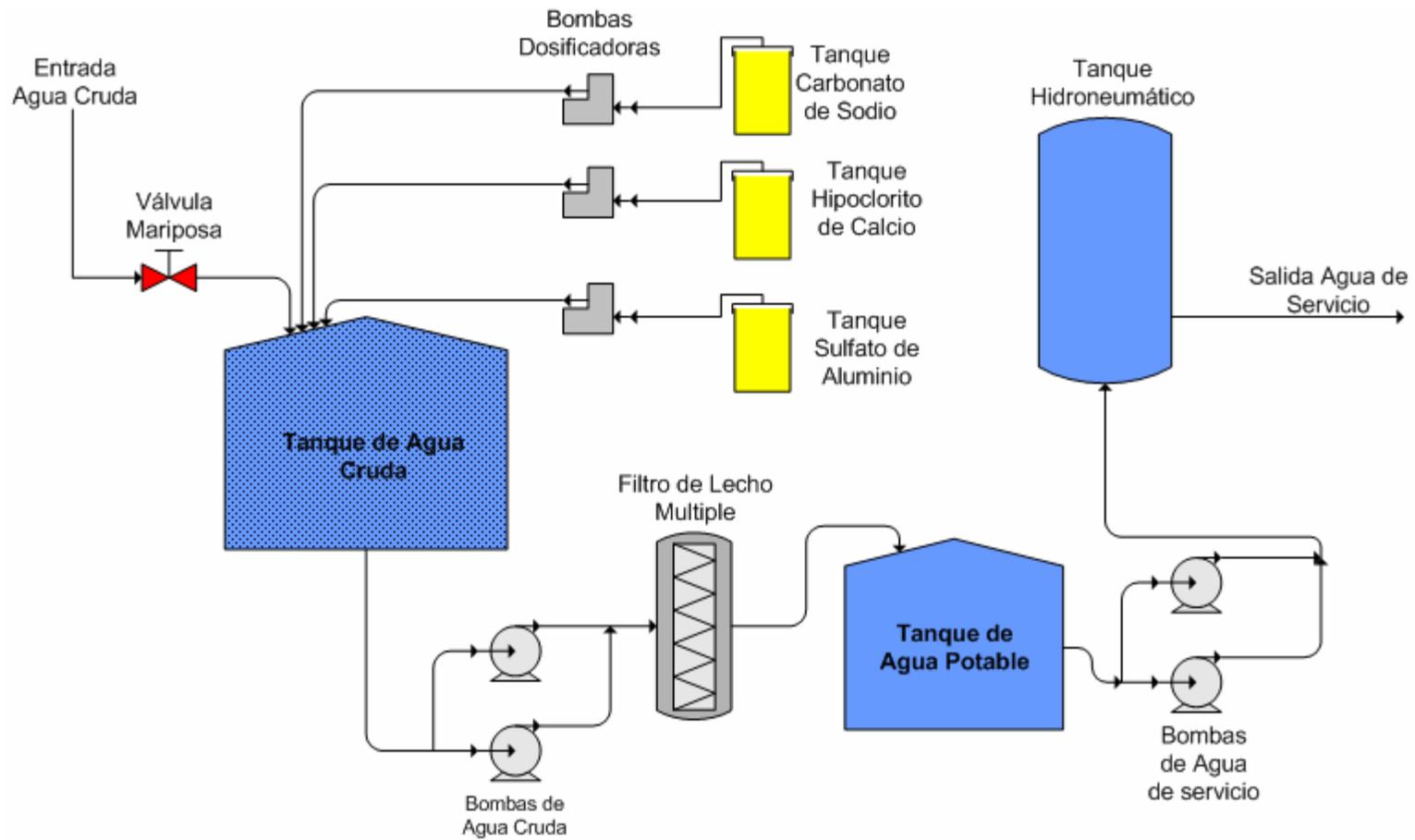


Figura 3.3 Sistema de potabilización en su antigua configuración

Dentro del proceso de potabilización puede distinguirse cinco módulos independientes pero complementarios, como se muestra en la Figura 3.4. Debido a los cambios y desperfectos, los módulos de dosificación y almacenamiento en el tanque de agua cruda se realizaban de manera totalmente manual y los restantes de forma automática, pero sujetos a diferentes fallas en el equipo, las cuales serán explicadas posteriormente con más detalle. Todo esto creaba un sistema poco preciso y bajo un concepto de control en el cual en lugar de ayudar a facilitar las labores de los operarios más bien las complicaba.

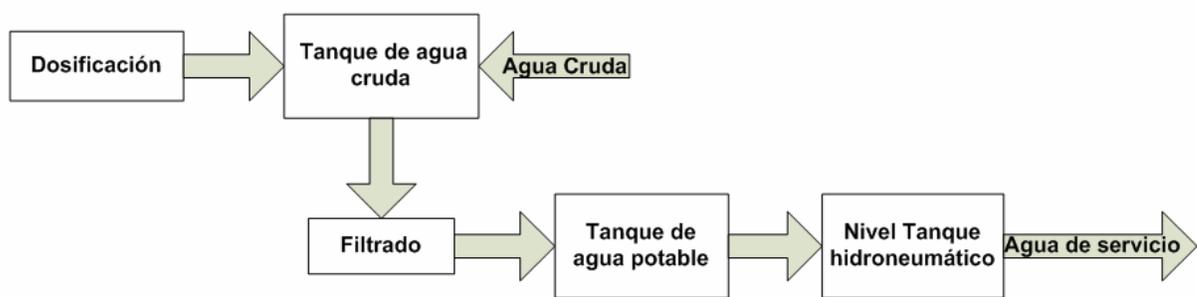


Figura 3.4 Esquema general del proceso de potabilización en su configuración anterior

3.2 Antecedentes Bibliográficos

3.2.1 Automatización y control

3.2.1.1 Descripción del PLC

El PLC utilizado es el SLC500 de tipo modular de la marca Allen Bradley, y está compuesto por los módulos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Módulos que conforman el PLC

Cantidad	Módulo	Nº de catalogo	Descripción
1	Procesador SLC 5/03	1747-L532	Procesador con puertos RS232 y DH485. 16Kbytes de memoria total
2	Fuente de alimentación	1746-P3	Fuente de poder para 24V
4	Entradas discretas	1746-IB16	Cada tarjeta con 16 entradas
3	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
2	Entradas analógicas	1746-NI8	Cada tarjeta con 8 entradas
3	Salidas analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas
2	Chasis	1746-A10	Capacidad de 10 ranuras
1	Cable de comunicación	1746-C9	Para comunicación entre racks

Procesadores SLC 5/03 (Nº de catálogo 1747-L532)

Dentro de las principales características que ofrece el procesador SLC 5/03 :

- Tamaño de memoria total de 16 K.
- Control de hasta 4096 puntos de entrada y salida.
- Programación en línea (incluye edición en tiempo de ejecución).
- Canal DH-485 incorporado.
- Canal RS-232 incorporado compatible con full-duplex DF1, maestro/esclavo half-duplex DF1 para SCADA, DH-485 usando un 1761-NET-AIC con cable 1747-CP3 y protocolos ASCII.
- Reloj/calendario en tiempo real incorporado.
- 2 ms de interrupción temporizada seleccionable (STI).
- 50 ms de interrupción de entrada discreta (DII).
- Funciones matemáticas avanzadas: trigonométricas, PID, exponenciales, punto flotante (coma flotante) e instrucciones de calculo.
- Direccionamiento indirecto.
- El PROM de la memoria flash proporciona actualizaciones de firmware sin cambiar EPROMS físicamente.
- Modulo de memoria flash EPROM opcional disponible.
- Interruptor de llave: RUN, REMote, PROGram.
- RAM con batería de respaldo.

Esta información fue recopilada de la bibliografía 5: Procesadores modulares SLC 500.

3.2.2 Comunicación y monitoreo

Dentro de las opciones de comunicación se tomaron en cuenta las características que el mismo módulo del procesador podía ofrecer las cuales se muestran en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Opciones de conexión física del procesador 5/03

Canal	Posibilidades
DH485	<ul style="list-style-type: none">➤ velocidades de comunicación de hasta 19.2 K baudios➤ aislamiento eléctrico a través de 1746-AIC➤ longitud de red máxima de 1219 m (4,000 pies)➤ especificaciones eléctricas RS-485➤ conexión de cable Belden 9842 entre nodos (conexión en cadena)
RS-232	<ul style="list-style-type: none">➤ velocidades de comunicación de hasta 19.2 K baudios➤ distancia máxima entre dispositivos de 15.24 m (50 pies)➤ especificaciones eléctricas RS-232C➤ soporte de módem➤ aislamiento incorporado

Nota: Información obtenida de 5: Procesadores modulares SLC 500

3.2.2.1 Opciones de protocolo

Dentro de las opciones de protocolos de comunicación (4, Allen) que pueden ser utilizados con el procesador 5/03 se encuentran:

a. Protocolo DH485

El procesador SLC 500 tiene un canal DH-485 que ofrece soporte a la red de comunicación DH-485. Esta red es un protocolo de red de maestros múltiples, de paso de testigo, con capacidad de hasta 32 dispositivos (nodos). Este protocolo permite:

- El control de los estados de datos y del procesador, conjuntamente con la carga y descarga de cualquier dispositivo en una red desde una ubicación

- Que los procesadores SLC se pasen datos entre ellos (comunicación entre dispositivos semejantes)
- Que los dispositivos de interfase de operador obtengan acceso a datos desde cualquier procesador SLC en la red

b. Protocolo DF1 Full-Duplex

El protocolo DF1 Full-Duplex (también llamado protocolo punto a punto DF1) permite que dos dispositivos se comuniquen entre ellos uno a la vez. Este protocolo permite:

- la transmisión de información a través de módems (llamada, línea alquilada y radio)
- la comunicación entre productos de Allen-Bradley y productos de terceros.

c. Protocolo DF1 Half-Duplex esclavo

El protocolo DF1 Half-Duplex esclavo proporciona una red de derivaciones múltiples, de un solo maestro/esclavos múltiples, con capacidad para 72 dispositivos (nodos). Este protocolo también proporciona soporte de módem y es ideal para aplicaciones SCADA (Control Supervisor y Adquisición de Datos) debido a la capacidad de red. Ya que éste es un protocolo maestro/esclavo, tiene que haber un dispositivo en la red que esté ejecutando un protocolo maestro DF1 half-duplex.

3.2.2.2 AIC+

El AIC+ (advanced interface converter, ver Figura 3.5) número de módulo 1761-NET-AIC, posee varios modos de configuración dentro de los cual destacan:

- Punto a punto aislado
- RS-232 a RS-485 aislado

La comunicación se puede establecer utilizando hardware *handshaking* o señales de transmisión automática.

Dentro de los dispositivos compatibles y que pueden ser interconectados se encuentran:

- SLC 500, procesadores: 5/01, 5/02 y 5/03 (canal 1)
- Procesadores SLC 5/03, 5/04 y 5/05 (canal 0).
- Controladores MicroLogix 1000
- PC puerto serie (o cualquier dispositivo puerto serial de 9 pines DTE)

Para mayor información consultar el manual de usuario del dispositivos (2, Allen).

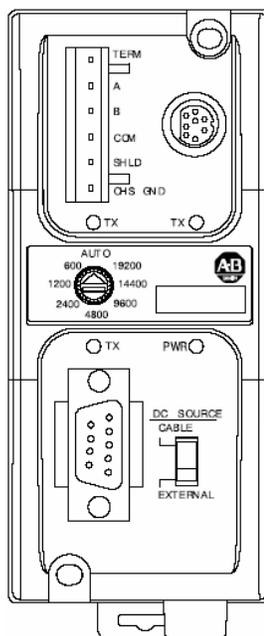


Figura 3.5 Dispositivo AIC+

3.3 Parámetros para la calidad del agua potable

Las directrices dispuestas por el área química para la calidad del agua, se centran en cuatro parámetros descritos a continuación:

3.3.1 Cloro

La acción desinfectante del cloro deriva de su alto poder oxidante en la estructura química celular de las bacterias, destruyendo los procesos bioquímicos normales de su desarrollo. Las condiciones del medio que optimizan el resultado de esta desinfección son la concentración de cloro, pH, temperatura y tiempo de contacto. La característica principal del cloro para su uso como desinfectante es su presencia continua en el agua como cloro residual. La normativa sanitaria determina que las aguas de consumo humano tendrán una concentración mínima de cloro residual libre o combinado, o algún otro agente desinfectante (14, Hanna).

Además, el cloro no solo actúa como desinfectante, sino que también reacciona con otros elementos presentes en el agua, como amoníaco, hierro, manganeso y otras sustancias productoras de olores y sabores, mejorando la calidad del agua. Por otro lado, una concentración excesiva de cloro en el agua provoca su rechazo inmediato por parte del consumidor. No es perjudicial para la salud, pero da un sabor muy fuerte y desagradable al agua si su concentración supera los 0,5 mg/l (ver Tabla 3.5) de cloro residual, que es la cantidad de cloro que existe en el agua en forma de ácido hipocloroso o en forma de ión hipoclorito.

3.3.2 pH

La calidad del agua y el pH son a menudo mencionados en la misma frase. El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH. Por ejemplo, las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 6,5 y 8.

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrogeno (H^+) en una sustancia. La acidez es una de las propiedades más importantes del agua. El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua.

El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7 (16, Lenntech).

El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7, más básica o ácida será la solución.

El pH es un factor logarítmico; cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. Cuando una solución se vuelve cien veces más ácida, el pH disminuirá en dos unidades. El término común para referirse al pH es la alcalinidad.

3.3.3 Turbidez

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua.

Se mide en NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez. El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (16, Lenntech).

Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente

por debajo de 1 NTU. Es la Tabla 3.4 se mencionan algunos parámetros organolépticos con sus valores máximos recomendados por la OMS (10, CEPIS).

3.3.4 Conductividad

La conductividad eléctrica es la capacidad que el agua tiene de conducir la corriente eléctrica. Este parámetro tiene relación con la existencia de iones disueltos en el agua, que son partículas con cargas eléctricas. Cuanto mayor sea la concentración de iones disueltos, mayor será la conductividad eléctrica de la agua. En las aguas continentales, los iones que son directamente responsables de los valores de la conductividad son, entre otros, el calcio, el magnesio, el potasio, el sodio, carbonatos, sulfatos y cloratos (25, USP).

El parámetro de conductividad eléctrica no nos indica, específicamente, cuales son los iones presentes en una determinada muestra de agua, pero puede ayudar a detectar posibles impactos ambientales que ocurran en la captación del agua debido a la descarga de desperdicios industriales, minería, aguas fecales, etc.

Entre más alto es el contenido de minerales en el agua, más alta es la conductividad. Una conductividad alta es sinónimo de corrosión debido a la facilidad del flujo de corriente. Para la conductividad se menciona aceptable un valor menor de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según especificaciones de la OMS mostradas en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Parámetros organolépticos determinantes en la calidad del agua

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Color	UCV (a)	-	15
Turbiedad	NUT	1	5
Olor	Factor dilución	0	Debe ser aceptable
Sabor	Factor dilución	0	Debe ser aceptable

(a) UCV, Unidad de Color Verdadero

Tabla 3.5 Algunos parámetros físico-químicos determinantes en la calidad del agua

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Cloro residual	mg/l	0.2-0.5 (a)	(b)
Cloruros	mg/l	25	250
Conductividad	µS/cm	400	-
Sulfatos	mg/l	25	250
Sodio	mg/l	-	200
hierro	mg/l	-	0.3
Aluminio	mg/l	-	0.2
Cobre	mg/l	-	1

(a) Cloro residual libre

(b) 5 mg/l con base en evidencia científica las cuales han demostrado que este valor no afecta la salud.

3.4 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

3.4.1 Filtro de lecho múltiple

Este filtro se encarga retener partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el agua cruda, típicamente los filtros marca CULLIGAN, modelo HD-362 remueven hasta un tamaño de partícula de 10 micrómetros. Y dependiendo de la turbiedad se puede obtener eficiencias de filtración de hasta un 90% (23, Tratagua).

El filtro de lecho múltiple posee diferentes medios de filtrados que absorben y acumulan suciedad, por esto es necesario someterlo a un proceso de limpieza conocido como retrolavado.

El proceso de limpieza se desarrolla diariamente a una hora prefijada en el “timer”. Este proceso desarrollado gracias a la configuración de la válvula de control de tipo multipuerta, con 6 cartuchos tipo diafragma, los cuales operan de forma independiente y regulan el flujo de agua a través del filtro, durante los cuatro ciclos de acondicionamiento o estados de funcionamiento:

- a. **Servicio (SR):** este es el estado normal de funcionamiento, permite un flujo de agua directo desde la entrada pasando por los medios de filtrado hasta la salida. La disposición de las compuertas en modo de servicio se muestran en la Figura 3.6¹.
- b. **Retrolavado (BW):** se lleva a cabo invirtiendo el sentido de agua a través de los medios filtrantes durante 15 min, esto provoca que el lecho de arena se agite botando toda la suciedad acumulada por la tubería de drenaje. La disposición de las compuertas en modo de servicio se muestran en la Figura 3.7.

¹ Los diagramas para los estados de funcionamiento de servicio y retrolavado fueron obtenidos del manual de instalación y operación Hi-Flo 55 Water Filter (11, Culligan)

- c. **Pausa (BR):** realiza una pausa en el proceso, de 15 min para que los medios filtrantes se asienten.
- d. **Enjuague (CR):** este proceso es similar al estado de servicio solo que en lugar de dirigir el agua hacia la salida esta va directo al drenaje, la duración de este estado es de 5 min.

Cada uno de estos estados es controlado por válvulas hidráulicas mecánicas y por un dispositivo tipo "TIMER" que se encuentra sobre el filtro a la par de la válvula multipuerta (ver Figura 3.8).

Los cartuchos se mueven por medio de la presión de entrada en el filtro ejercida por las mismas bombas que hacen pasar el agua a través del filtro.

Toda el agua utilizada en este proceso proviene del tanque de agua potable.

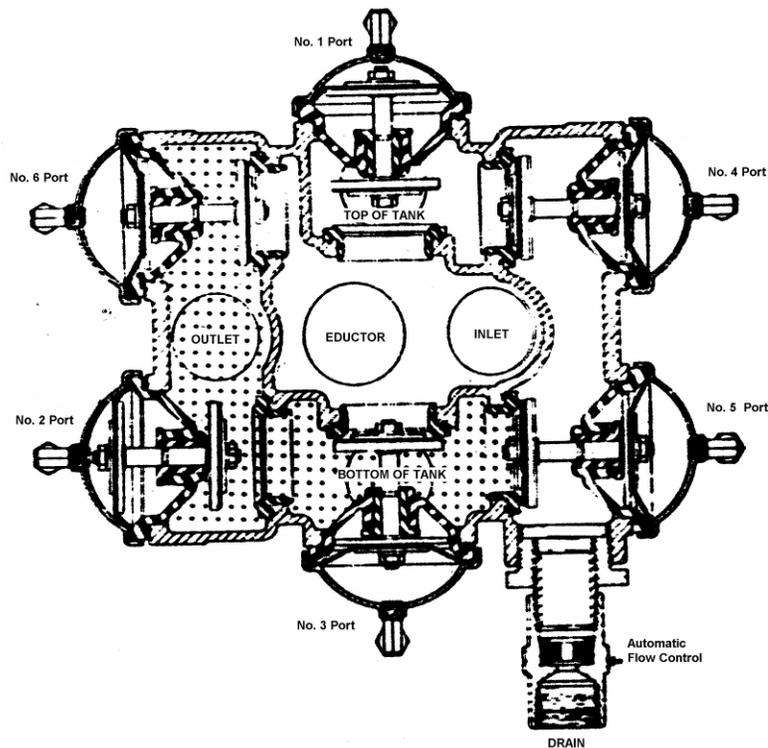


Figura 3.6 Ubicación de las compuestas de la válvula multipuerta en el modo de servicio

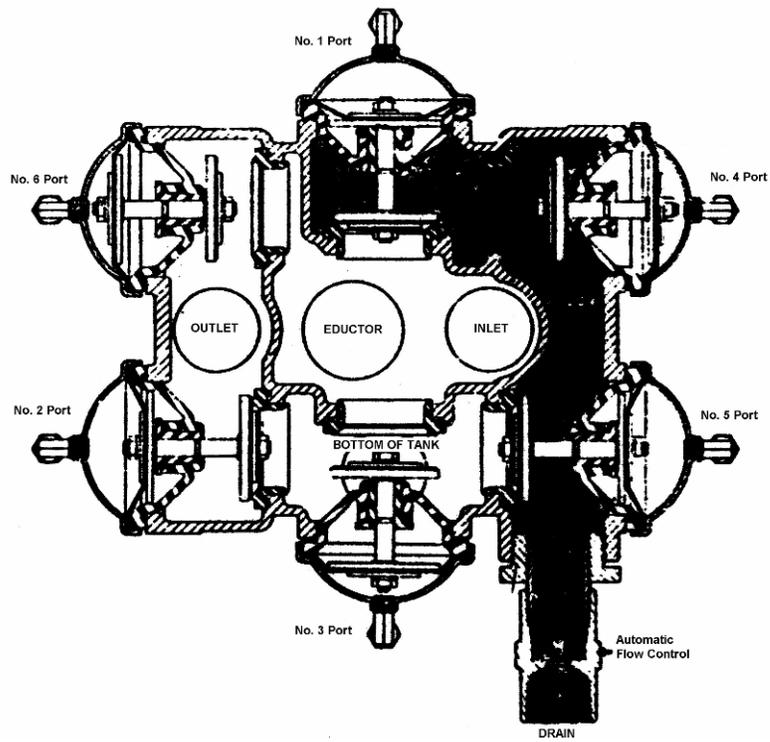


Figura 3.7 Ubicación de las compuestas de la válvula multipuerta en el modo de retrolavado



Figura 3.8 Válvula multipuerta y "timer" del filtro de lecho múltiple

3.4.2 Capacidad de control de las bombas de dosificación

Las bombas de dosificación se utilizan en la incorporación de químicos para lograr que el agua cruda pueda ser de consumo humano. Esta incorporación depende de las características de control que permiten las mismas; a continuación se hace referencia a las capacidades de las bombas ya que estas influyen en los cálculos para el proceso de dosificación automatizado.

En el proceso de dosificación se utilizan dos tipos marcas de bombas de dosificación, por un lado se encuentran las bombas LPH6MA-PTC3-XXX de Pulsatron y por otro las bombas B71 de Milton Roy. La diferenciación de estas bombas se encuentran en su capacidad de bombeo y condiciones de presión a las que pueden ser sometidas, estas se muestran en la **Tabla 3.6**.

Tabla 3.6 Capacidades máximas de bombeo de las bombas de dosificación

Fabricante	Modelo	Bombeo máximo (l/h)	Presión máxima de bombeo (psi)
Pulsatron	LPH6MA-PTC3-XXX	18.9	100
Milton Roy	B711-91s	6.1	150

El principio de funcionamiento de ambas bombas es el mismo. Trabajan por medio de un mecanismo electromagnético (solenoides), el cual es conectado a un diafragma. Cuando el solenoide es activado por un circuito de control, este empuja el diafragma, el cual con la ayuda de válvulas “check”, mueve el fluido así a la descarga de salida. Cuando el solenoide es des-energizado, este vuelve a su posición original trayendo consigo parte del fluido, proveniente de la entrada, hacia el diafragma de la bomba, donde el ciclo se vuelve a repetir (20, Pulsatron). De esta manera, las bombas dosifican por impulsos, el largo de estos impulsos (*stroke length*) y la frecuencia (*stroke frequency*) determinan la capacidad de bombeo de las bombas de dosificación, su forma de regulación se describe a continuación:

- Frecuencia de impulsos (*stroke frequency*): puede ser controlado de 10 a 100% (12 a 125 impulsos por minuto). El ajuste se puede hacer de forma

manual, moviendo la perilla (*stroke rate %*) en la parte posterior de la bomba o por medio de la señal 4-20 mA cuando se encuentra en modo automático.

➤ Largo de impulsos (*Stroke length*): puede ser controlado de 0 a 100%, esto regula el desplazamiento del diafragma. Para fines prácticos se recomienda una variación de 20 a 100%. Para el ajuste únicamente se utiliza la perilla para este fin, en la parte posterior de de la bomba.

Control por medio de señal 4-20 mA

La señal 4-20 mA únicamente varía la frecuencia de impulsos de la bomba siempre y cuando este colocado en modo AUTO para el caso de las bombas Pulsatron y en modo Externo para las bombas Milton Roy. La variación de la velocidad es lineal como lo muestran los gráficos de la Figura 3.9 y la Figura 3.10, tomadas de los manuales de operación y mantenimiento de cada bomba respectivamente (referencias: 18, Milton;20, Pulsatron).

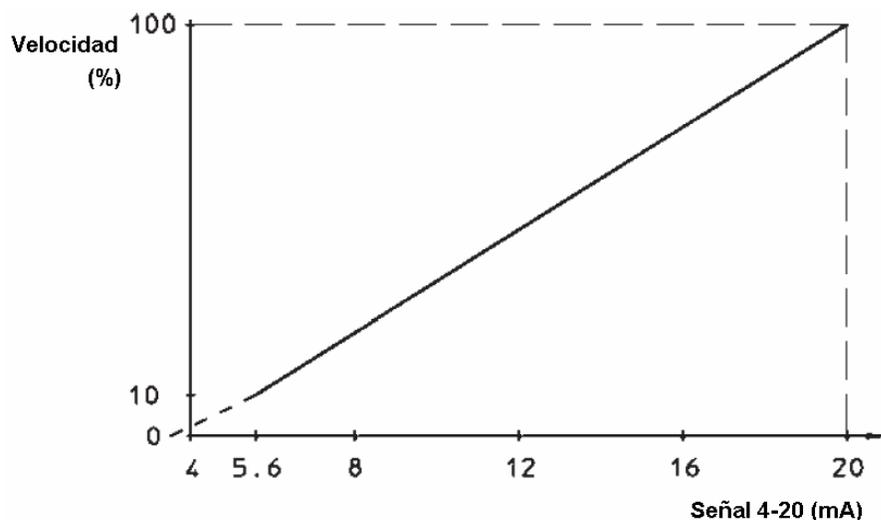


Figura 3.9 Porcentaje de variación de la velocidad con respecto a la señal de entrada de 4 a 20 mA para las bombas Pulsatron

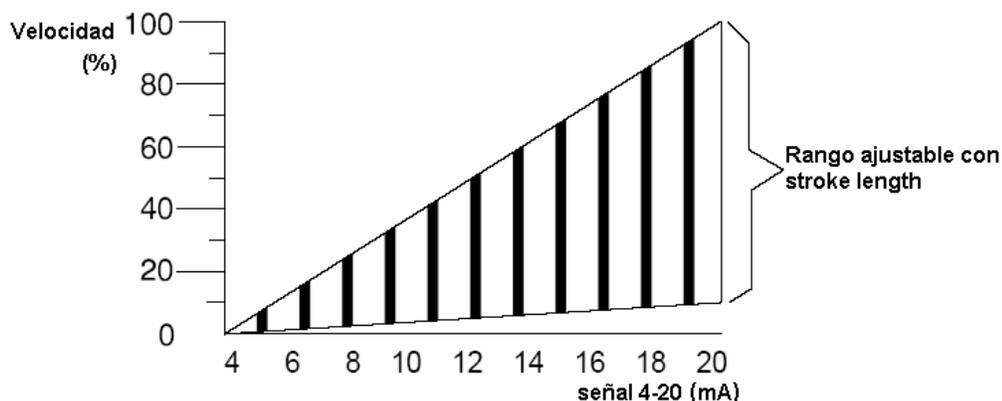


Figura 3.10 Porcentaje de variación de la velocidad con respecto a la señal de entrada de 4 a 20 mA para las bombas Milton Roy

3.4.3 Instrucción proporcional integral derivativa

Dentro del juego de instrucciones del PLC SLC 500, se encuentra la instrucción PID. Esta es una instrucción de salida que permite controlar características físicas tales como temperatura, presión, nivel de líquido o régimen de caudal utilizando lazos de proceso. En el caso del sistema de potabilización se utiliza en el control del pH.

La instrucción PID controla normalmente lazos cerrados utilizando para su propósito módulos de entrada y salida analógicos. En el sistema de potabilización el pH es monitoreado utilizando un módulo de entrada analógico el cual detecta la señal de 4-20mA que envía el medidor de pH, instalado para tal propósito, luego, el PID realiza los cálculos necesarios para mantener el pH neutro (7) utilizando la bomba de carbonato de sodio, que es controlado por una señal 4-20 mA, generado por un modulo analógico de salida en el PLC.

La instrucción PID se puede operar en el modo temporizado o el modo STI. En el modo temporizado, la instrucción actualiza su salida periódicamente a un régimen seleccionado por el usuario. En el modo STI, la instrucción se debe colocar en una subrutina de interrupción STI. Entonces actualiza su salida cada vez que se realiza un escaneo de la subrutina STI. El intervalo de tiempo STI y el régimen de actualización de lazo deben ser idénticos para que la ecuación se ejecute correctamente (1, Allen).

3.4.3.1 Concepto PID

En un sistema de control a lazo cerrado, el PID retiene la variable de proceso (PV) en un punto de ajuste deseado. Un ejemplo del régimen de caudal/nivel de fluido se muestra en la Figura 3.11.

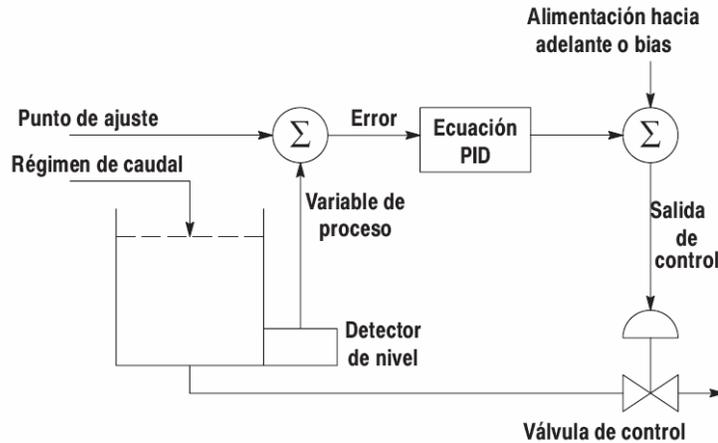


Figura 3.11 Ejemplo de control de nivel de un fluido a lazo cerrado con PID

La ecuación PID controla el proceso enviando una señal de salida a la válvula de control. Cuanto más grande sea el error (E) entre el punto de ajuste y la entrada de variable de proceso, tanto más grande es la señal de salida y viceversa. Un valor adicional (alimentación hacia adelante o bias) se puede añadir a la salida de control como offset. El resultado del cálculo PID (variable de control) impulsará la variable de proceso que controla, hacia el punto de ajuste.

3.4.3.2 La ecuación PID

La instrucción PID utiliza la ecuación estándar con ganancias dependientes:

$$salida = K_C \left[(E) + \frac{1}{T_I} \int (E) dt + T_D \cdot \frac{d(PV)}{dt} \right] + bias$$

Los rangos de variación de las constantes estándar para la ecuación se muestran en la **Tabla 3.7**.

Tabla 3.7 Constantes de ganancia estándar para la ecuación del PID

Término	Rango (bajo a alto)	Referencia
Ganancia K_C	0.1 a 25.5	Proporcional
Término de restablecimiento $1/T_I$	25.5 a 0.1 (minutos por repetición)	Integral
Término de régimen T_D	0.01 a 2.55 (minutos)	Derivativo

3.4.4 Método empírico de sintonización para PID

3.4.4.1 Curva de reacción de Ziegler-Nichols

Este método de ajuste para PID es válido sólo para plantas estables a lazo abierto (13, Goodwin). Muchas plantas en la práctica pueden describirse satisfactoriamente con un modelo general para la función de transferencia mostrada a en la siguiente ecuación:

$$G_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{\gamma_0 s + 1}; \Rightarrow \gamma_0 > 0$$

Una versión linealizada cuantitativa de este modelo puede obtenerse mediante un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Llevar manualmente la planta a lazo abierto a un punto de operación normal manipulando $u(t)$. Supongamos que la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$.
2. En un instante inicial t_0 aplicar un cambio escalón en la entrada de u_0 a u_∞ .
3. Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. La Figura 3.12 muestra una curva típica.
4. Calcular los parámetros del modelo general a partir de las siguientes fórmulas:

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1$$

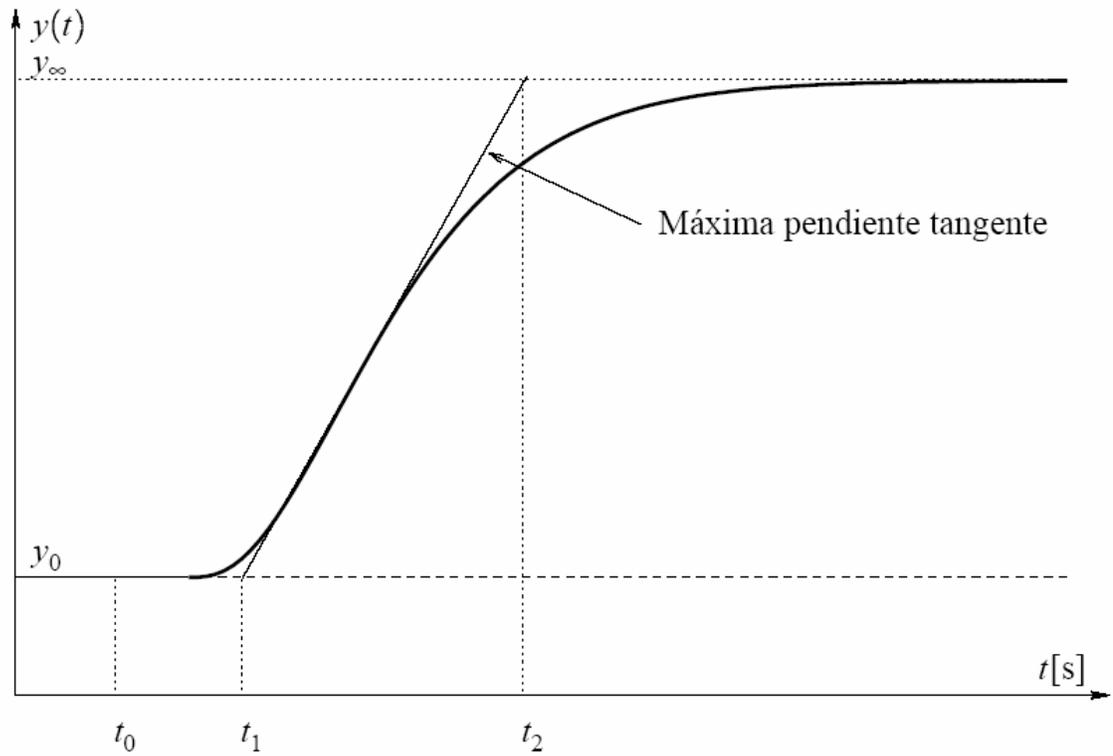


Figura 3.12 Respuesta al escalón típico por el método de curva de reacción en lazo abierto de la planta

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se determinan de la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Regulador	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	-	-
PI	$\frac{0.9\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$3\tau_0$	-
PID	$\frac{1.2\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

3.4.4.2 Desempeño con el método de la CR de Z-N

Para analizar el desempeño obtenido con el ajuste de Ziegler-Nichols a partir de la curva de reacción, se considera la función de transferencia genérica mostrada en la sección anterior.

La Figura 3.13 muestra la respuesta del lazo cerrado con un controlador PID ajustado mediante el método de Ziegler-Nichols para distintos valores de $x = \tau_0/\gamma_0$. El eje de tiempos se representa normalizado en unidades de t/τ_0 .

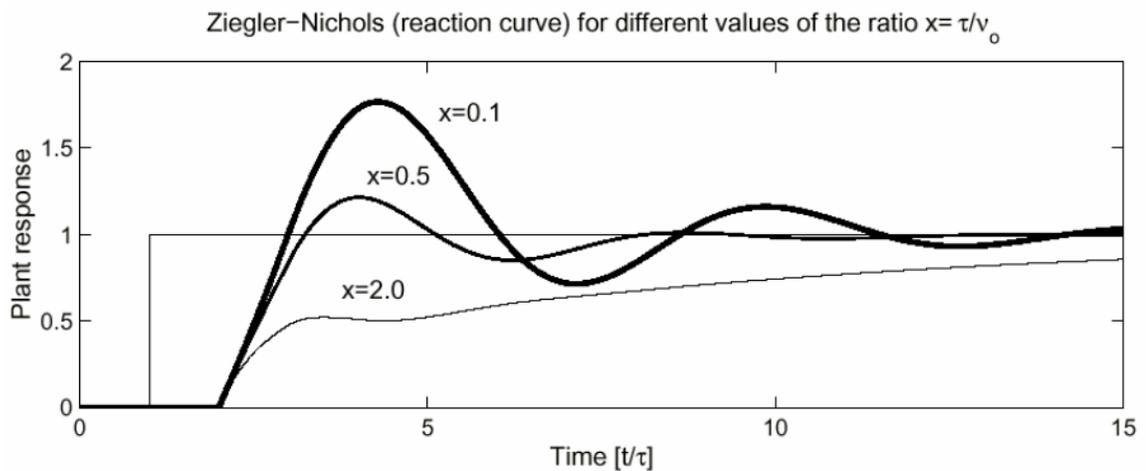


Figura 3.13 Respuesta a lazo cerrado de la planta genérica con PID ajustado de la curva de reacción vía Ziegler-Nichols

El efecto del incremento de las ganancias K_p , T_i y T_d del controlador PID en un sistema a lazo cerrado se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.9 Efecto del incremento de las ganancias de un controlador PID

Ganancia	Tiempo de crecimiento (T_r)	Sobre impulso (M_p)	Tiempo de establecimiento (T_s)	Error estado permanente (E_p)
K_p	Disminuye	Aumenta	Poco efecto	Disminuye
T_i	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Eliminado
T_d	Poco efecto	Disminuye	Disminuye	Poco efecto

CAPITULO 4: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Dentro de CGM existen dos áreas a cargo del proyecto del sistema de potabilización, por un lado, se encuentra el área química, encargados del proceso y manipulación del sistema, y por otro, el área de mantenimiento, encargados de llevar a cabo el proyecto y suplir las necesidades que se presenten en cuanto a detección y corrección de fallos. Durante todo el proyecto las entrevistas, comentarios y observaciones fueron la principal fuente de información. La consulta en ambas áreas fue de vital importancia para la obtención definitiva de la solución del problema.

La meta o alcance del proyecto se definió a partir de las políticas de mantenimiento emprendidas por el CGM. Predicción, prevención y corrección son parte de la estrategia de mantenimiento impulsada por la empresa, siempre en busca de calidad y obtención de mejores beneficios.

La primera parte de automatización y control por medio de la incorporación de un PLC, ya había sido concebida con anterioridad, sin embargo, no habían sido definidos sus objetivos ni metodología, para incorporar este tipo de tecnología al nuevo proceso de potabilización. La definición de estos surge a partir del problema mismo, el cual a raíz de entrevistas y reuniones con encargados del proceso fueron tomando forma (siempre bajo una connotación hacia la división en sub problemas, para facilitar la obtención de la solución).

Posteriormente surge la idea de la incorporación al proyecto, la segunda parte, comunicación y monitoreo, utilizando para ello el sistema Wonderware instalado en el centro de control del CGM, el cual forma parte del sistema de mantenimiento predictivo.

Wonderware, al ser un sistema SCADA, posee múltiples herramientas de trabajo que facilitan por medio de software las interacciones humano maquina, sin embargo, para no extender proyecto a limites fuera del alcance preestablecido, se decidió definir los objetivos, en cuanto a comunicación y monitoreo, es decir, al desarrollo de una pantalla mímico para el sistema de potabilización en la herramienta In Touch, lo

que implicaba a su vez la comunicación efectiva entre el PLC y el sistema Wonderware.

4.1 Obtención y análisis de información

Como el objetivo principal del proyecto era modernizar un sistema de potabilización que sufrió continuos desperfectos desde sus inicios, la búsqueda de información de primera mano se basó en entrevistas realizadas primero al personal encargado de la manipulación del sistema, es decir, área química, donde se realizaron preguntas relacionadas con la operación del sistema como por ejemplo: ¿Cuál era el propósito del sistema?, ¿Cuál es el efecto de los químicos dosificadores en el agua?, ¿Cuál es el procedimiento ideal de dosificación? entre otros.

Luego de tener una idea clara de la operación y funcionamiento del sistema, se dio pie a entrevistar a los técnicos encargados de su manipulación, para posteriormente realizar un análisis del desempeño general del sistema y las expectativas que la nueva solución debía brindar.

Dentro de los métodos para evaluar la información preliminar, sobresale el análisis de costos. Aunque la mayor parte del equipo con costo elevado, ya había sido licitado, se requirió la compra de material adicional. Para ello se dividió los materiales según su tipo y se hicieron diferentes cotizaciones a proveedores reconocidos por el CGM, para los cuales se licitó el de menor costo.

La principal restricción para el desarrollo del proyecto fue que no se contaba con presupuesto para la compra de equipo costoso (aparte del que ya se había licitado), por lo que la solución quedaba sujeta a las limitantes técnicas del equipo comprado. Principalmente, el PLC Allen Bradley fue el que brindó el mayor número de limitantes, debido a que es la pieza principal en la que se basa la modernización del proceso, por lo que el equipo adicional debió adaptarse a esta tecnología.

4.2 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

En la parte de automatización se habla de una única propuesta, la incorporación de un PLC para el control del sistema de potabilización, ya que la empresa había estimado esta posibilidad, he incluso se encontraba en tramites de compra antes del inicio del proyecto de graduación. A parte del PLC se adquirió nuevos dispositivos para la automatización del proceso dentro de los que se encuentran: válvula neumática, transmisores de nivel capacitivos, medidor de pH, medidor de flujo entre otros.²

La consulta a asesores fue de vital importancia para llegar a obtener la solución definitiva, sin embargo se tomo también en cuenta la opinión de varios técnicos con experiencia reconocida, quienes brindaron información importante en cuanto a descripción de equipos y su debida manipulación.

Como primera referencia para modificar la solución, se tomo en cuenta las entrevistas realizadas a ingenieros y técnicos encargados del proyecto, así, haciendo un análisis del desempeño del proceso anterior, se estudio las posibilidades de modificar aquellas partes del sistema de potabilización que requerían una mejora para sacar el mayor provecho al cambio de tecnología que se estaba implementando.

La propuesta final de solución, se sometió a una serie de interrogativas y consultas por parte de asesores y técnicos, con tal de que la solución contara con la logística necesaria para iniciar una puesta en marcha.

² Ver tabla de equipo licitado antes de iniciado el proyecto de graduación en el apéndice, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

4.3 Implementación de la solución

A continuación se hace referencia al procedimiento seguido para la obtención de la solución.

a. Características de los elementos del sistema

Se desarrolló una serie de tablas con las principales características eléctricas y/o mecánicas para cada uno de los elementos que conforman el nuevo proceso de tratamiento³. Para tal propósito se utilizaron los manuales y hojas de datos que la misma empresa poseía, sin embargo, la mayor cantidad de información se obtuvo de Internet, debido a que en su mayoría el equipo se encontraba en trámites de compra, por lo que no se contaba con los manuales impresos suministrados por los fabricantes.

El propósito fue obtener las características básicas de los elementos con mayor importancia, para ampliar la perspectiva del problema y la vez como primera aproximación al funcionamiento de estos dispositivos.

b. Determinación de variables

Se desarrollo una primera lista con las variables que intervienen en el proceso de potabilización, como por ejemplo: encendido y apagado de bombas, señales analógicas, activación y desactivación de válvulas, botones de encendido, entre otras⁴.

Para el desarrolló de esta etapa se contó con la ayuda de los técnicos operarios y de mantenimiento quienes brindaron información importante del proceso.

Esta lista se desarrolló en las primeras semanas ya que la empresa que se le otorgo la licitación para la compra del PLC, ofreció desarrollar el panel de control principal, por lo que requería información sobre el numero de variables, ubicación

³ Ver características eléctricas y/o mecánicas en el apéndice

⁴ La lista final de variables se encuentra en el Manual de Mantenimiento en la sección dispuesta para este propósito.

de módulos además de la distribución de las luces indicadores y botones en el panel.

c. Establecer características del PLC

Se estudió las posibilidades y limitaciones, a nivel de hardware, con las que contaba el PLC Allen Bradley SLC 500. Se utilizaron los manuales del fabricante que se encuentran a disposición en Internet. Se estudió cada uno de los módulos que iban a ser utilizados en cuanto a características eléctricas y de funcionamiento.

d. Estudio de manuales de programación para el PLC

Se buscó en Internet manuales y técnicas de programación para el PLC SLC 500 marca Allen-Bradley, donde se puede destacar el Manual de Referencia: Juego de Instrucciones del SLC 500 y Micrologix 1000 (1, Allen), el cual es una guía bastante amplia y detallada de todas las instrucciones disponibles en el PLC además de brindar ejemplos de programación. A parte del juego de instrucciones, fue necesario leer información sobre el programa RSLogix en el cual se desarrolló el programa escalera, debido a la poca familiaridad que se tenía con el mismo (21, Rockwell).

e. Identificación de lazos de control y desarrollo de modelado

Desde un inicio se habló de la idea de implementar dos lazos de control, uno para el flujo de agua de entrada y otro para el control de pH en la sección de dosificación. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se llegó a la conclusión de que desarrollar un sistema de control para el flujo no estaba bien fundamentado, ya que era innecesario, debido principalmente al regulador de presión que antecedió a esta etapa provocando que el flujo permaneciera constante. Esto dio pie, a desarrollar únicamente un PID para el control del grado de alcalinidad.

f. Análisis para la obtención de controladores PID

El proceso de análisis para el lazo de control de pH se realizó cuando el sistema ya estaba instalado, se empezó por obtener la respuesta experimental del sistema ante un escalón, de donde se obtuvieron los datos necesarios para su análisis. A partir de esta respuesta se realizó un análisis empírico para ajustar el PID, mediante el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.

g. Establecimiento de posibles módulos de programación

Con base en el análisis del problema, y después de obtenido un buen panorama del sistema de potabilización, se dividió el proceso en diferentes módulos o etapas, para cada uno de los cuales se desarrollaron diagramas de flujo. A su vez, se fue incorporando cada diagrama de flujo con su posible desarrollo en diagrama escalera, para facilitar su posterior programación.

h. Establecimiento de procedimientos y pruebas de programación

Una vez hecho el desarrollo preliminar de los diagramas de flujo, se estableció el modo de programación más conveniente, siempre tomando en cuenta las sugerencias y advertencias del manual de referencia. En esta etapa del procedimiento ya se contaba con el panel principal (aún sin instalar), esto permitió que cada módulo desarrollado en diagrama escalera, pasara por una prueba preliminar de funcionamiento, utilizando para ello los indicadores lumínicos, generadores de señales y por supuesto el mismo programa RSLogix que posee múltiples herramientas para la depuración.

i. Revisión del software programado por medio de prototipo experimental

Una vez realizado la programación del PLC, se verificó su funcionamiento (en cuanto a software) por medio de un prototipo de prueba experimental, como una forma de corroboración preliminar, antes del inicio de la puesta en marcha. El prototipo de prueba consistió en el panel principal junto con luces indicadoras y

generadores de señales 4-20mA, para los cuales se dispuso un procedimiento de prueba de tal forma que se simulara una condición de trabajo normal. Luego se desarrollaron pruebas con condiciones anormales de trabajo para detectar posibles fallas. Dentro de estas pruebas se desarrollaron múltiples cambios en la programación que no habían sido consideradas.

j. Puesta en marcha primera parte, Automatización y Control

Como primera parte de la puesta en marcha se procedió a la revisión del sistema según su correspondiente modulo de programación bajo condiciones normales de trabajo. Conforme se revisaba, se anotaban y corregían las incongruencias en la lógica de escalera.

Como segunda parte se desarrolla el mismo procedimiento solo que esta vez bajo condiciones anormales, probando de esta manera las respectivas alarmas.

k. Verificación del correcto funcionamiento del proceso de potabilización

Esta etapa consiste en el funcionamiento integral de todas las etapas del proceso, garantizando que el producto, que en este caso era el agua, tuviera las características idóneas para el consumo. Para esto se realizaron pruebas de laboratorio a cargo del área química, quienes validaron la prueba.

l. Estudio del sistema Wonderware

En vista del escaso conocimiento que se poseía del sistema Wonderware se procedió al estudio del mismo, por medio de la utilización de los manuales que el CGM posee. Estos explican de forma muy detallada la forma más conveniente para el desarrollo de una interfase humano-máquina, además de brindar ejemplos que resultaron de mucha utilidad. Además se contó con la asesoría de expertos quienes brindaron información importante.

m. Estudiar posibles formas de comunicación del PLC

Se estudiaron las posibles formas en las que el PLC puede establecer una comunicación serial mediante el protocolo eléctrico RS-485 hacia un servidor remoto. Se utilizó para ello la búsqueda en Internet y la consulta con asesores.

n. Establecer comunicación entre PLC y Wonderware

Esta etapa presento cambios de último momento, debido a que el sistema Wonderware instalado en el CGM no contaba con los controladores (*driver*) necesarios para desarrollar la comunicación por medio del AIC+ por lo que en lugar de una conexión directa entre el PLC y el I/O Server del Wonderware se utilizó el RSLinx como programa intermediario mediante DDE (Intercambio dinámico de datos, por sus siglas en ingles).

o. Puesta en marcha segunda parte Comunicación y monitoreo

Se verificó que la conexión se realizara correctamente mediante un análisis de paquetes de datos de entrada y salida, que el mismo programa RSLinx ofrece como herramienta de diagnostico. Dentro de la pantalla de monitoreo, se corroboró que las animaciones coincidieran con los eventos que se estaban presentado en tiempo real, para el sistema de potabilización. Además, se verificó que todas las alarmas correspondieran a sus respectivas fuentes.

p. Entrega de resultados, conclusiones y recomendaciones

Una vez concluido el proyecto, se realizó la entrega de resultados en tres etapas:

- **Charla a operarios:** consistió en un recorrido por las nuevas instalaciones del sistema de potabilización, donde se explico de forma detallada la forma de operación más conveniente del sistema, además de responder las dudas que los mismos operarios tenían.
- **Exposición final en el CGM:** fue dirigido a ingenieros y técnicos de las ares de química y de mantenimiento. Se expuso de forma general el

desarrollo del proyecto, toma de decisiones, resultados, conclusiones, y recomendaciones.

➤ **Capacitación a personal:** esta tenía como objetivo primordial, capacitar al personal encargado del mantenimiento del sistema de potabilización, con el fin de que estos puedan solventar cualquier problema que el PLC presente durante su funcionamiento, la duración fue de 3 días (ver cronograma en apéndice C).

Además, se desarrollo un manual de operación y otro de mantenimiento. El de operación, esta dirigido a aquellas personas encargadas de la manipulación del sistema, hace observaciones en cuanto a procedimientos, qué hacer en caso de falla, operación normal del sistema, entre otros. Por su parte, el manual de mantenimiento esta dirigido a personal de instrumentación y control, especifica más ampliamente respecto a la programación en el PLC, manipulación básica de paquetes de software como RSLinx y RSLogix, búsqueda de fallas, entre otros. Ambos manuales se encuentran en el apéndice A.

4.4 Reevaluación y rediseño

Dentro de las posibles mejoras que puede tener el proyecto, quizás la más relevante se encuentra en la parte de *Comunicación y Monitoreo*, más específicamente en el sistema Wonderware. El sistema desarrollado, muestra detalladamente el proceso del sistema de potabilización, bajo la perspectiva de monitoreo, por lo que se esta desaprovechando mucho de la capacidad que el sistema Wonderware ofrece, como por ejemplo el control a distancia. Esto permitiría a los operarios controlar el proceso desde el cuarto de control, sin necesidad de trasladarse al lugar donde se desarrolla. Por otra parte, podría introducirse un medidor flujo a la salida del tanque hidroneumático para contabilizar la cantidad de agua que se consume, para llevar un mejor control del mismo.

CAPITULO 5: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN

La nueva configuración del sistema de potabilización se muestra en la Figura 5.1. En general no se presentan cambios en cuanto al proceso mismo excepto en el sistema de dosificación, donde se eliminó la larga distancia que debían recorrer los químicos y se pasó a la forma de dosificación en línea, según las especificaciones del Ingeniero Químico Jorge Vindas.

Se cuenta con la incorporación de nueva tecnología, basado en un diseño centralizado por medio de la incorporación de un PLC encargado de comandar todo el proceso de potabilización, además de nuevos sensores que hacen del proceso un sistema más autónomo.

Dentro de las restricciones de diseño se utilizaron dispositivos con señales de 4-20 mA como estándar de medición para señales analógicas, dentro de los que se puede citar: medidores de pH y flujo, control de apertura y cierre de la válvula neumática, transmisores de nivel, entre otros.

El proyecto está orientado al desarrollo tanto a nivel de hardware como de software, ambos complementarios entre sí. El desarrollo del hardware se puede dividir en diferentes módulos, en la parte de automatización y control:

- Diseño de paneles de control Principal y Local
- Diseño control del sistema de dosificación
- Diseño del control del filtro de lecho múltiple
- Diseño y control del tanque hidroneumático
- Diseño de circuitos de interconexión y control

En la parte de comunicación y monitoreo se menciona el diseño de sistema de comunicación.

Dentro del desarrollo de software, en el caso de automatización y control se dividió el proceso en cinco módulos principales:

- Dosificación
- Control de nivel del tanque de agua cruda
- Control del Filtro de Lecho Múltiple (FLM)
- Control del nivel del tanque de agua potable
- Control de nivel del tanque hidroneumático

En la parte de comunicación y monitoreo se habla del desarrollo de la pantalla de monitoreo mediante la utilización de la herramienta InTouch de Wonderware.

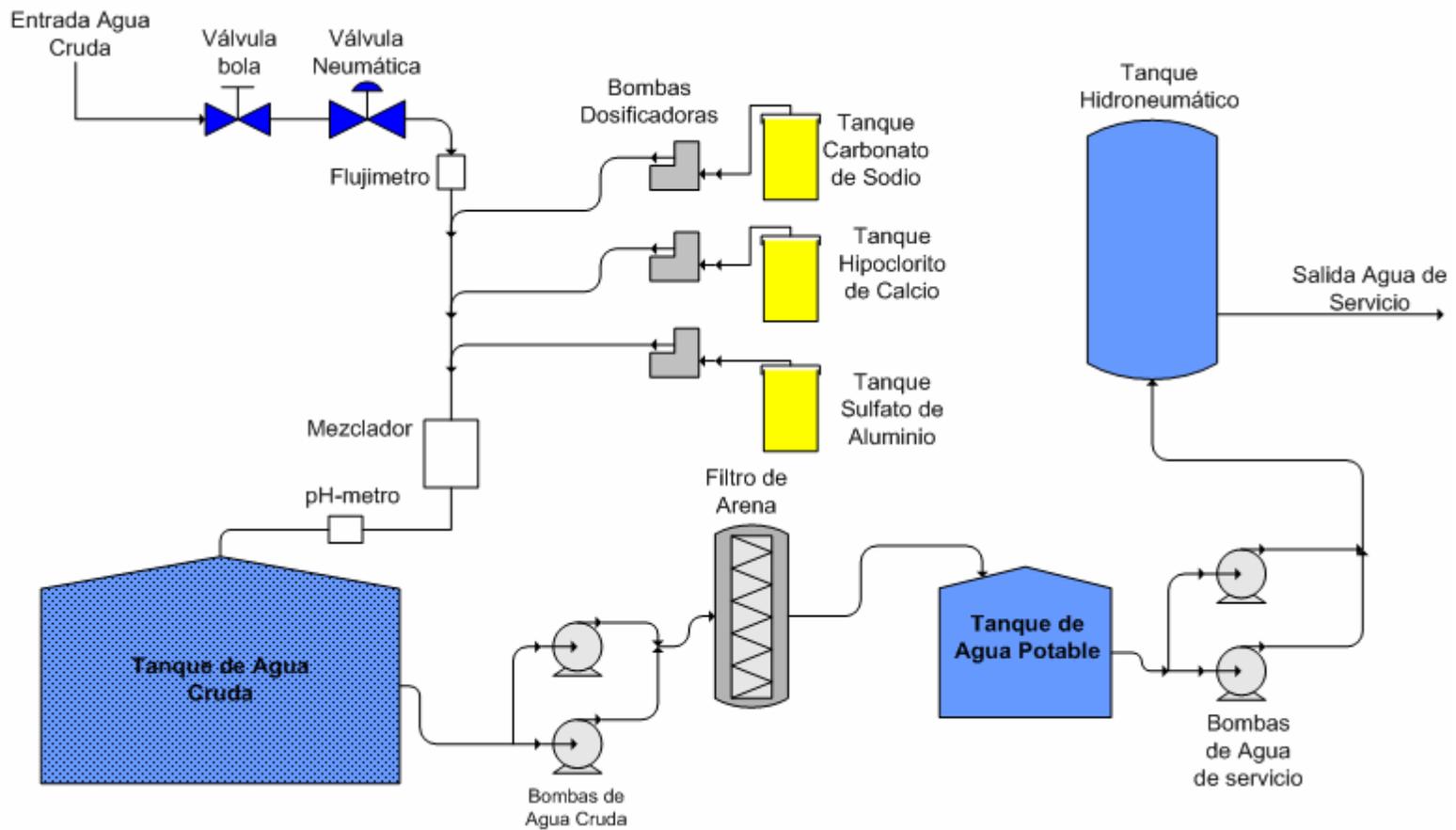


Figura 5.1 Distribución del sistema de potabilización en su configuración actual

5.1 Análisis de soluciones y selección final

5.1.1 Automatización y Control

Como se ha mencionado con anterioridad, en la primera parte de automatización y control, la solución estaba definida a utilizar un PLC de la marca Allen Bradley como parte de la estrategia de modernización planteada por el CGM, antes del inicio del proyecto de graduación. En vista que parte del equipo con mayor costo ya había sido licitado, se procedió a proyectar la estrategia de solución en base a estas adquisiciones.

Parte de la propuesta era utilizar la mayor cantidad de equipo que se encontraba en el sistema de potabilización anterior, debido principalmente a que no se contaba con presupuesto para la adquisición de nuevos componentes con costo elevado. Sin embargo luego de inspeccionar el equipo con el que se contaba, se llegó a la conclusión de que parte de este estaba obsoleto, por lo que el proceso de potabilización se vería perjudicado. Dentro de los elementos que presentaron mayor problema estaban:

- **Filtro de lecho múltiple:** como se especifica en el marco teórico, el filtro de lecho múltiple, tiene diferentes etapas de funcionamiento: servicio retrolavado, pausa y enjuague. Estas etapas eran comandadas por un sistema tipo “TIMER” (mecánico), el cual en los últimos meses presentaba desperfectos en sus mecanismo, lo que perjudicaba el proceso de limpieza del filtro. En vista de la complejidad del aparato se planteó la solución de sustituirlo por un sistema de electro-válvulas comandadas por el PLC, permitiendo no solo simplificar el problema, sino, creando un sistema más confiable que podría ser incorporado al sistema de monitoreo con mayor facilidad, algo que no se podía hacer anteriormente.
- **Tanque Hidroneumático:** para controlar este tanque se contaba con cuatro electrodos: dos para el control del nivel de agua y dos para la activación de alarmas, además de una válvula mecánica liberadora de presión para aquellos casos en que se excediera lo normal. Para este caso

se sugirió la incorporación de un sensor de nivel, un sensor de presión y válvulas para drenaje de agua y recargo de aire, esto mejoró no solo el monitoreo del sistema, sino que permitió una mayor autonomía del mismo.

5.1.2 Comunicación y monitoreo

En la segunda parte de comunicación y monitoreo se sugirió la utilización del protocolo eléctrico RS-485, este permite un alcance máximo de aproximadamente 1200 metros, el cual estaba muy por encima de los 125 metros que se requerían para comunicar el PLC con un servidor en el edificio principal. Para realizar este tipo de comunicación surgieron dos propuestas:

- Vía convertidores RS-232 a RS-485: esta idea sugería la utilización de dos convertidores con un costo aproximado de \$150 cada uno.
- Vía AIC+: este dispositivo de la marca Allen Bradley utiliza el protocolo DH-485 sustentado en el protocolo eléctrico RS-485. En este caso se requería únicamente un dispositivo con un costo de aproximado de \$200, ya que el PLC contaba un puerto DH-485.

En vista que el principal criterio de selección era el costo, se optó por utilizar un AIC+ como intermediario de comunicación.

Conflicto de protocolos

Wonderware posee diferentes programas para interactuar con dispositivos de otras marcas, específicamente para la marca Allen Bradley se utiliza el paquete de software I/O Server. Según la propuesta inicial, la idea era comunicar el PLC con el servidor "Geoserver" en el edificio principal, ya que este posee la licencia para productos Wonderware. Sin embargo, surgieron dos problemas durante la implementación:

- El servidor no disponía de puertos de comunicación RS-232 libres, y creaba conflictos al momento de instalar una nueva tarjeta PCI para comunicación RS-232.

- El programa I/O Server instalado, carecía del driver para comunicarse con el dispositivo AIC+.

Para solucionar estos conflictos surgió la idea de utilizar otro servidor, no obstante se requería la compra de una nueva licencia de hardware para Wonderware, además del driver para el I/O Server. Esta idea se descartó en vista de que el costo de una nueva licencia rondaba los \$2000, lo cual estaba fuera del alcance presupuestario del proyecto.

Al buscar nuevas propuestas, se encontró que el programa InTouch de Wonderware podía utilizar Intercambio Dinámico de Datos (DDE) con otros programas fuera de la familia Wonderware, por lo que se instaló el programa RSLinx Profesional dentro del servidor "Mira2". El RSLinx no solo permitía la comunicación DDE sino que también disponía del driver para el AIC+, por lo que la propuesta final solucionó los dos problemas sin costo adicional.

5.2 Descripción de hardware en Automatización y control

5.2.1 Diseño de paneles de control Principal y Local

Dentro de la licitación de compra del PLC a la empresa: Automatizaciones Industriales de Centroamérica S.A. (GNE), se adjudicó también la compra del panel principal alambrado junto con el PLC, según las siguientes especificaciones:

- Cuatro módulos de 16 entradas discretas para un total de 64 entradas discretas
- Tres módulos de 16 salidas discretas para un total de 48 salidas discretas, 32 de ellas a relé
- Dos módulos de 8 entradas analógicas
- Tres módulos de 4 salidas discretas
- Todas las salidas y entradas desocupadas deberían ir alambradas a regleta
- Colocación de luces y botones en base al diseño desarrollado (ver Figura 5.3)

El diseño de la ubicación del PLC, las fuentes de alimentación, regletas y alambrado estuvo a cargo de GNE, sin embargo tuvieron pequeñas modificaciones durante la incorporación del nuevo equipo y circuitos de control. Estos circuitos aparecen como parte del Apéndice B.

El PLC instalado en el proceso de potabilización, esta estructurado en dos chasis de 10 ranuras cada uno, como se muestra en la Figura 5.2. En cada ranura se pueden ubicar indistintamente, módulos de entradas y salidas, a excepción de la ranura 0 que es exclusiva para el módulo del procesador. En la **Tabla 5.1**, se muestra la distribución y tipo de módulo utilizado por ranura. La ubicación de los módulos fue sugerida por la empresa GNE.

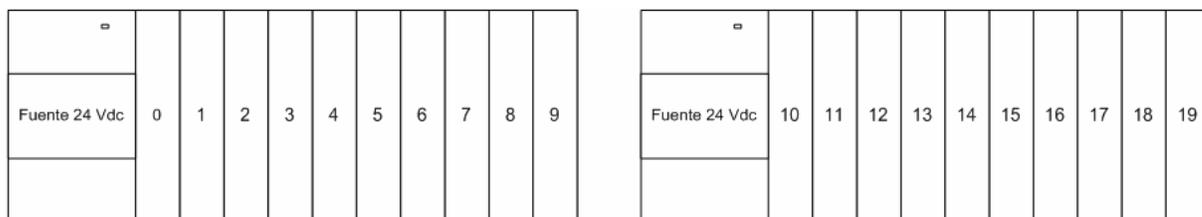


Figura 5.2 Distribución de las ranuras en el PLC del sistema de potabilización

Tabla 5.1 Ubicación de módulos por ranura

Ranura	Módulo	Nº de catálogo	Descripción
0	Procesador SLC 5/03	1747-L532	Procesador con puertos RS232 y DH485. 16Kbytes de memoria total
1,2,3,4	Entradas discretas	1746-IB16	Cada tarjeta con 16 entradas
5,6	Libres	---	---
7,8,9	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
10,11,12,13,14	Libres	---	---
15,16	Entradas Analógicas	1746-NI8	Cada tarjeta con 8 entradas
17,18,19	Salidas Analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas

Ubicación de luces y botones

La ubicación de las luces, botones y selectores en los paneles principal y local, tuvo diferentes etapas. Se tomo como referencia de diseño, el viejo panel de control principalmente por la familiaridad que los operarios tenían con este, sin embargo, estuvo sujeto a varias modificaciones:

- Se redujo a la mitad el número de luces y botones: varios de estos eran redundantes y la idea era simplificar el número de entradas y salidas en el PLC para disminuir el número de variables
- El viejo panel de control se dividió en dos paneles ahora llamados Principal y Local: en vista de que la ubicación del nuevo equipo se dividía en dos edificios, en el Panel Principal se controla el sistema de bombeo y distribución, y en el Panel Local el sistema de dosificación

Para llegar al resultado final se paso por un proceso de prueba y error, se desarrollaron diferentes bocetos que los mismos operarios sometieron a diferentes discusiones de donde surgió el resultado mostrado en la Figura 5.3 y Figura 5.4.



Figura 5.3 Distribución de luces y botones en el panel de control principal

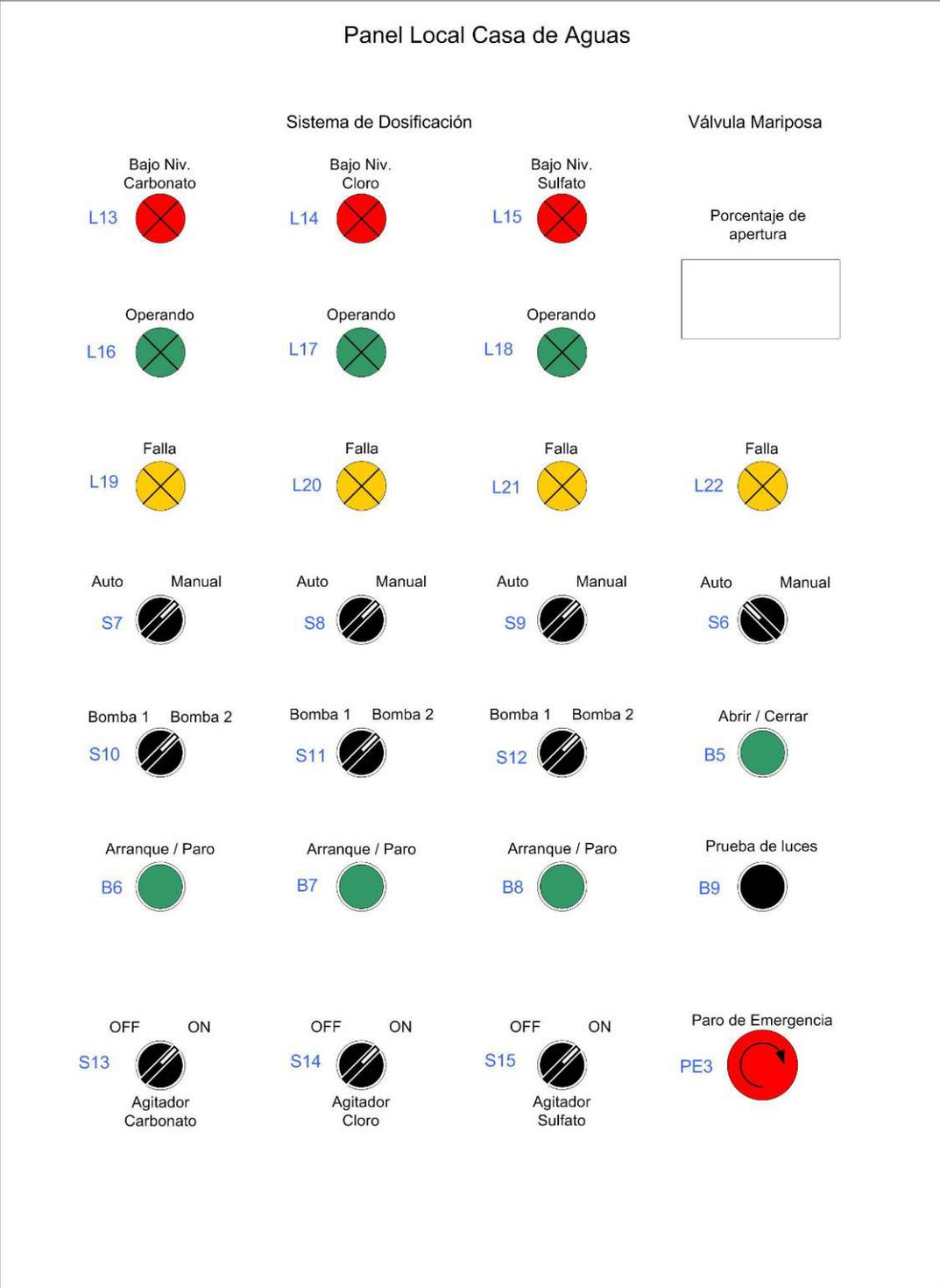


Figura 5.4 Distribución de luces y botones en el panel de control local

5.2.2 Diseño control del sistema de dosificación

El diseño del proceso del sistema de dosificación estuvo a cargo del Ingeniero Químico Jorge Vindas y el Ingeniero Eléctrico Roy Catón. Antes del inicio de proyecto de graduación, ya se tenía una idea de cómo debería estar dispuesto la distribución del nuevo sistema de dosificación. Primordialmente se mantendría un sistema de dosificación en línea, es decir dosificando directamente en la línea de entrada de agua cruda, como se muestra en la Figura 5.5.

Los elementos más importantes en esta etapa son:

- Válvula neumática: es la encargada de iniciar el sistema de dosificación, permite el paso de agua asía el tanque de agua cruda. Posee dos señales 4-20 uno para control y el otro indicador de posición. 4 mA significa que la válvula se encuentra cerrada y 20 mA abierta.
- Medidor de flujo: Se utiliza para el control de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio ya que su dosificación depende de la cantidad de agua que este ingresando. El medidor de flujo envía una señal 4-20mA directamente proporcional al flujo de entrada ajustado de 0 a 2000 l/min, esta señal llega directamente al módulo analógico de entrada del PLC.
- Medidor de pH: esta controla la bomba de carbonato de sodio. Este químico se utiliza para contrarrestar la disminución de pH producido por el sulfato de aluminio. El medidor de pH envía una señal 4-20mA proporcional al pH que se encuentra en la línea de entrada de agua cruda, ajustado de 0 a 14 grados de pH.

Además como medida de seguridad, se presento el sistema de dosificación con bombas auxiliares para que en caso de que alguna de ellas fallara el sistema no sufrirá un gran retraso en su sustitución.

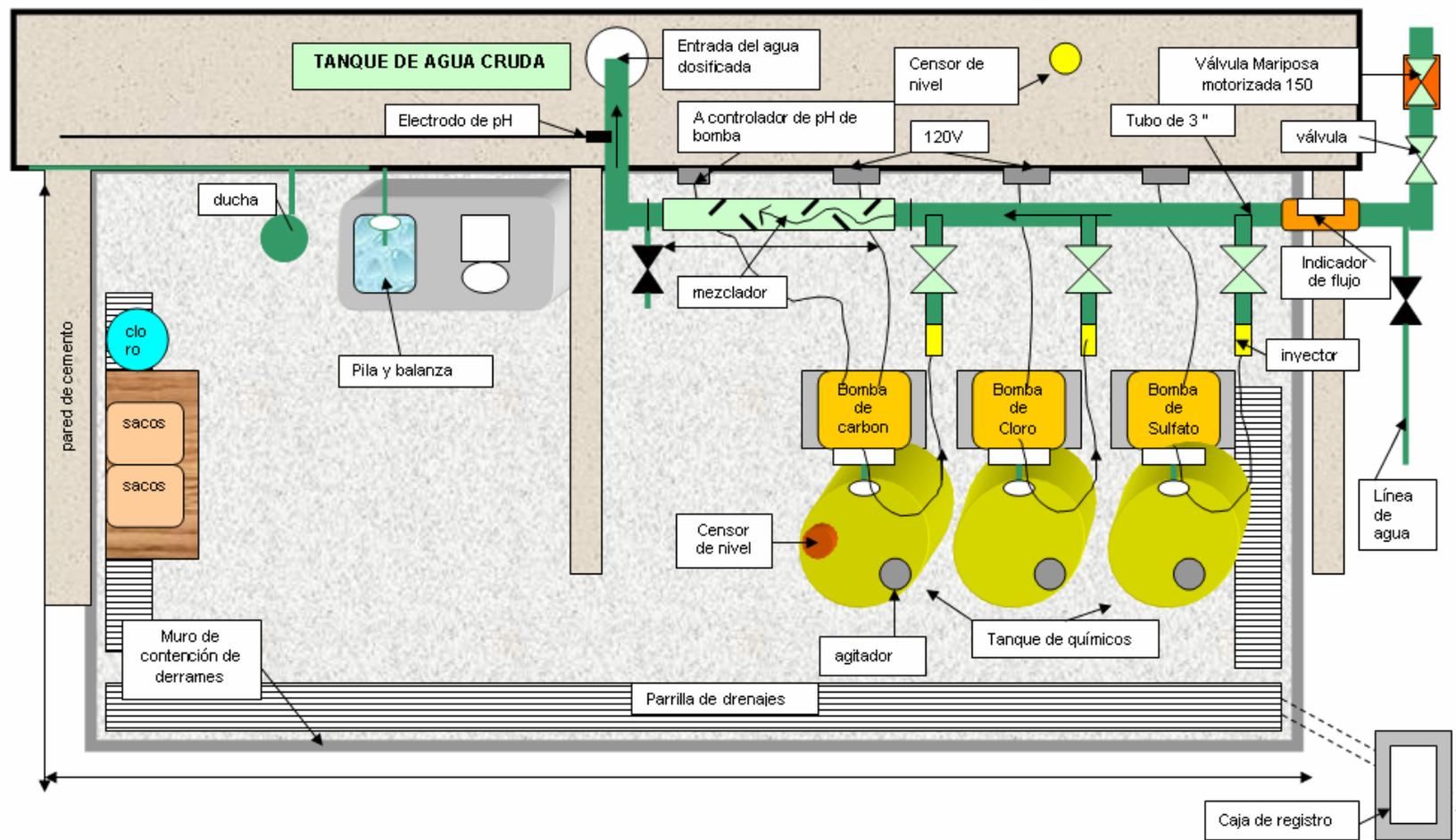


Figura 5.5 Distribución de los tanques de dosificación de químicos, entrada del agua y bombas dosificadoras, estructura del edificio general (elaborado por Ing. Jorge Vindas)

5.2.3 Diseño del control del filtro de lecho múltiple

A partir de la información bibliográfica (11, Culligan), se obtuvo el modo de operación de la válvula multipuerta encargada de comandar las diferentes etapas o ciclos de acondicionamiento del filtro de lecho múltiple (como se mencionan en la sección 3.4.1, del marco teórico). La válvula multipuerta esta compuesta de 6 cartuchos o puertas, de cuyas posiciones dependen sus etapas, como se muestra en la **Tabla 5.2**.

La puerta 6 no requiere de control para la ejecución de estas etapas, por lo que se diseño un sistema de 4 electro válvulas de 3 vías y 2 posiciones dispuestas de tal forma que en la etapa de servicio se encontraran desactivas, disminuyendo su tiempo de activación para mejorando su vida útil. En la **Tabla 5.3** se muestra la forma de activación de las válvulas solenoides según los ciclos de acondicionamiento.

Tabla 5.2 Estado de los diafragmas en los diferentes ciclos de acondicionamiento

Etapa	Puerta				
	1	2	3 y 4	5	6
Retrolavado	1	1	0	1	x
Pausa	x	x	x	x	x
Enjuague	0	1	1	0	1
Servicio	0	0	1	1	1

Nota: 0(puerta abierta); 1(puerta cerrada); X(indiferente)

Tabla 5.3 Estado de los solenoides en los diferentes ciclos de acondicionamiento

Etapa	Solenoides			
	1	2	3	4
Retrolavado	1	1	1	0
Enjuague	0	1	0	1
Servicio	0	0	0	0

Nota: 0(desactivo); 1(activo)

La distribución de las válvulas se muestra en la Figura 5.6.

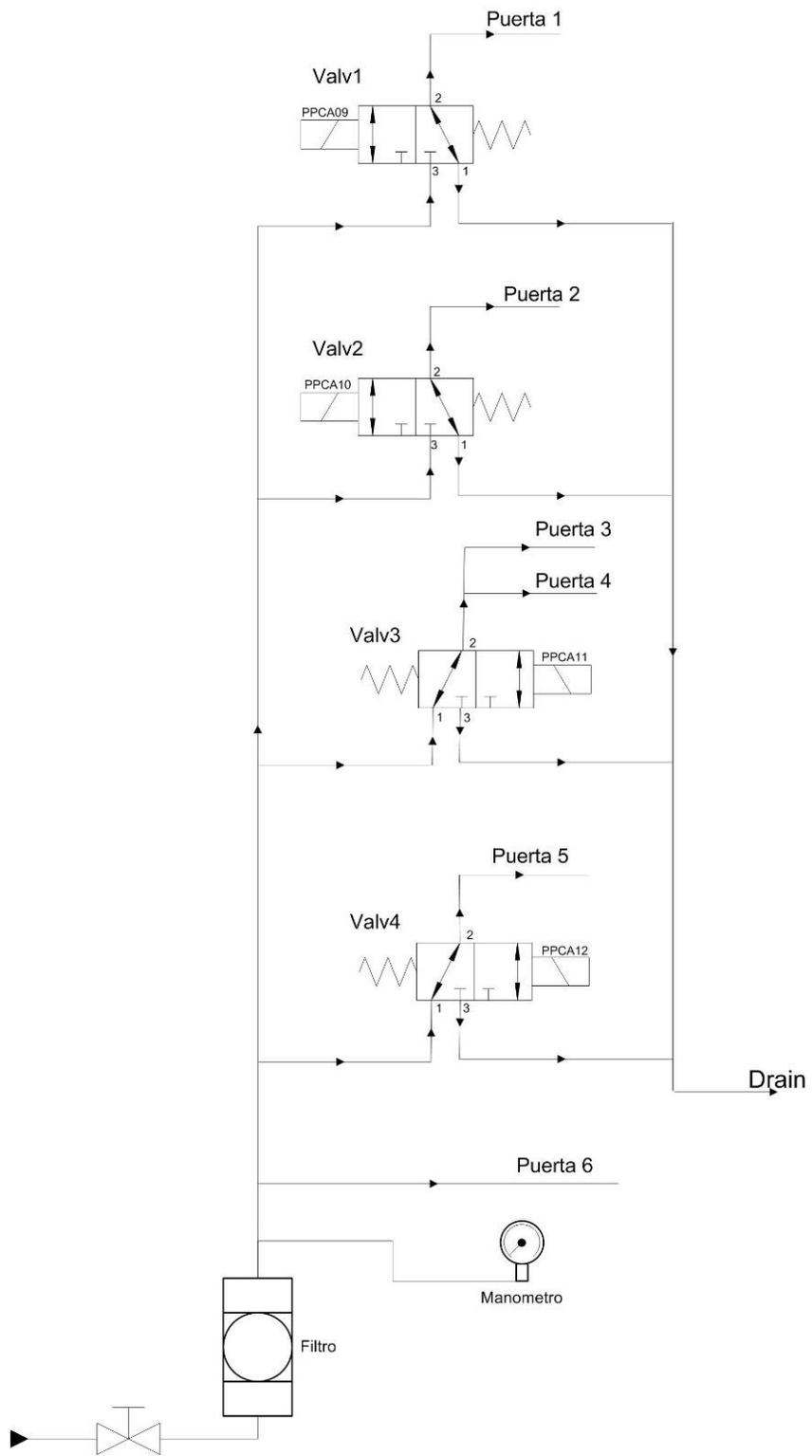


Figura 5.6 Nuevo sistema de control para la válvula multipuerta del filtro de lecho múltiple

5.2.4 Diseño y control del tanque hidroneumático

La idea de introducir nuevas mejoras en los sensores del tanque hidroneumático fue permitir un mayor control a nivel de software, dándole al sistema mayor versatilidad y autonomía.

Como parte complementaria del sistema de automatización se encuentra el sistema de monitoreo, y bajo esta premisa se sugirió la sustitución de los sensores en el tanque hidroneumático, dentro de los que se encuentran:

- Sensor de Presión: permite un mayor control de la presión en el sistema. Da autonomía al sistema de aire en el tanque, permitiéndole recargarse de forma automática, por medio de la electro-válvula surtidora de presión. Además permite el despliegue de alarmas tanto de baja como alta presión haciendo el sistema más seguro
- Transmisor de nivel: Este permite un mejor monitoreo del nivel del tanque y despliegue de alarmas. Utiliza un sensor de nivel por presión diferencial con una señal de salida de 4-20 mA
- Válvula de drenaje: permite drenar el tanque hidroneumático de forma automática, para eliminar la acumulación de residuos en el fondo del tanque, situación que debía hacerse de forma manual anteriormente
- Válvula surtidora de presión: trabaja complementariamente con el sensor de presión. Se activa y desactiva según las consignas dispuestas a nivel de software

5.3 Descripción de hardware en Comunicación y monitoreo

El diseño del sistema de dosificación está basado en la utilización del protocolo de comunicación RS-485. Esta tecnología permite un alcance máximo aproximado de 1200 metros muy por encima de lo requerido en la comunicación entre el PLC y el servidor Mira2 de 125 metros.

Se diseñó un sistema de comunicación punto a punto por medio de la utilización de un Advanced Interface Converter o AIC+ de la marca Allen Bradley utilizando el protocolo de comunicación DH-485 propio de este fabricante (ver Figura 5.7).

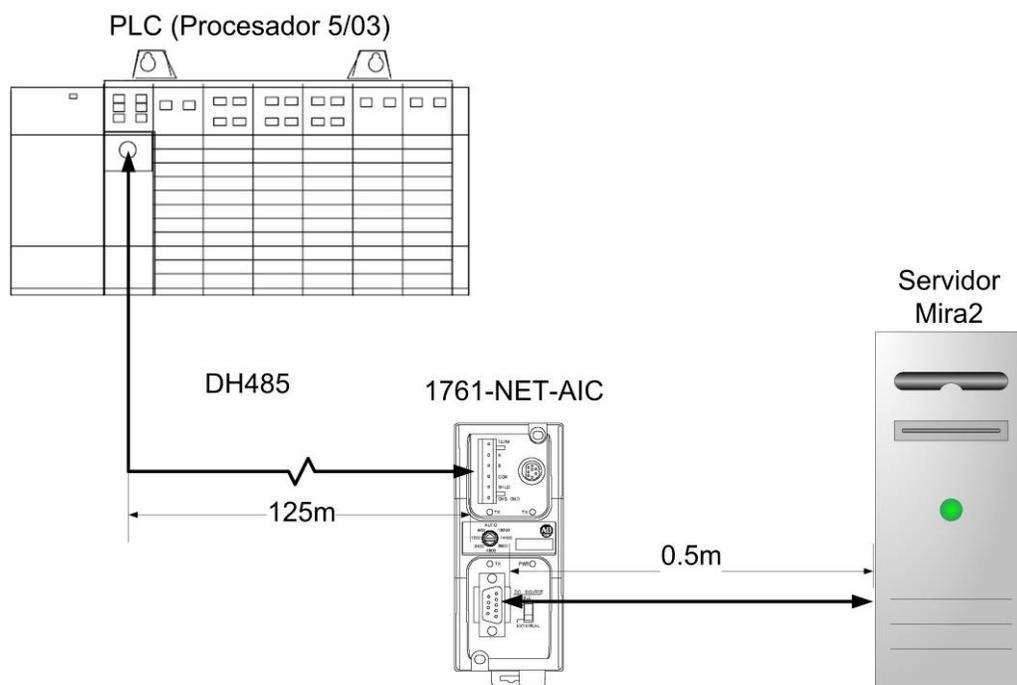


Figura 5.7 Comunicación punto a punto entre PLC y servidor Mira2

Dentro de sus ventajas permite una velocidad máxima de 19200 bps, además de permitir un aislamiento de 5000 V.

El cable de comunicación se extendió por medio de canasta metálica hasta el edificio principal, fuera de contacto de la intemperie.

El estilo de conector en el PLC es RJ-45 cuya configuración de colores se muestra en la Figura 5.8.

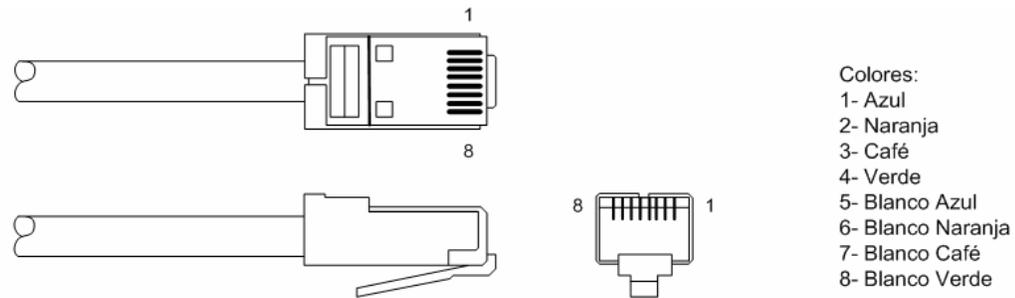


Figura 5.8 Configuración de colores en conector RJ-45

El diagrama de conexiones eléctricas para el sistema de comunicación se muestran en la Figura 5.9. En la conexión entre el PLC y el AIC+ se utilizaron las recomendaciones suministradas en el manual de usuario (2, Allen), para una conexión punto a punto. Por su parte, en la conexión entre el AIC+ y el puerto RS-232 del servidor “Mira2” se utilizó un cable cruzado DB9-DB9.

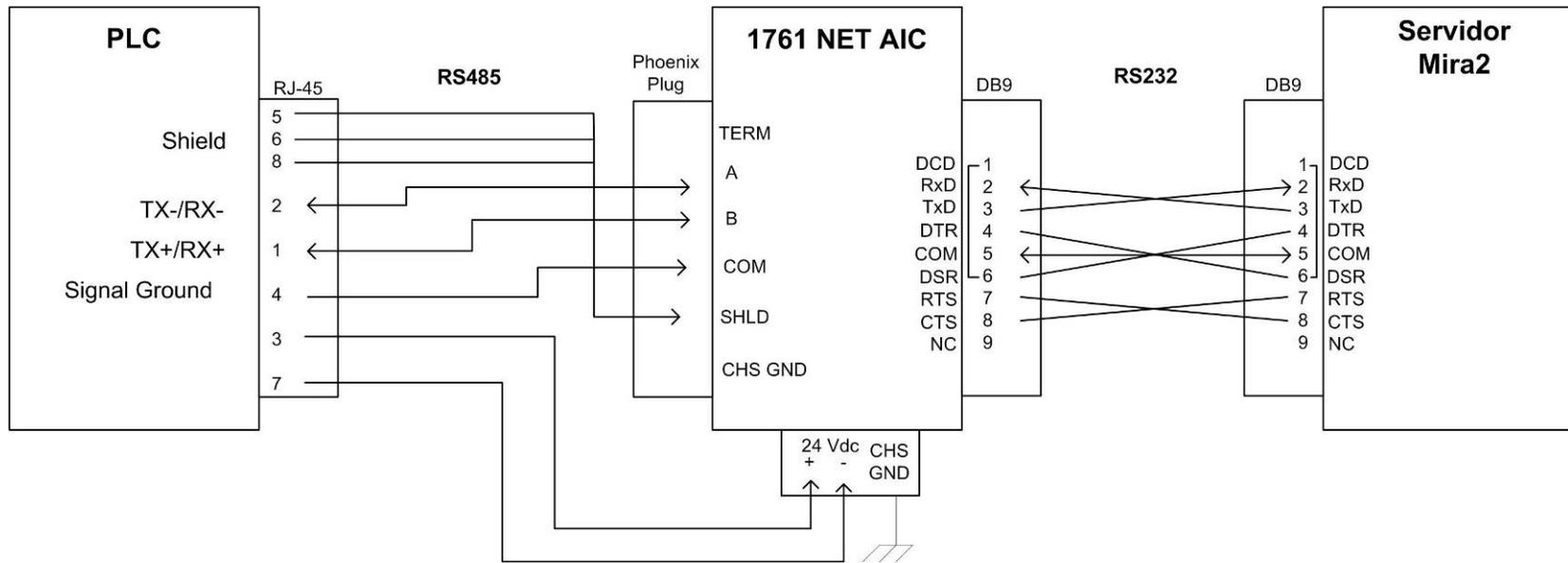


Figura 5.9 Circuito de conexión del sistema de comunicación punto a punto

5.4 Descripción de software en Automatización y Control

Para el desarrollo del programa escalera se subdividió el problema general en sub-problemas con menor complejidad. El sistema de potabilización propuesto paso a dividirse en cinco módulos claramente definidos como se muestra en la Figura 5.26. Este esquema general muestra el flujo del agua por las diferentes etapas del proceso antes de ser enviado al sistema de distribución.



Figura 5.10 Módulos del sistema de dosificación

Cada uno de estos módulos está relacionado entre sí, por pautas establecidas en secuencia del mismo proceso de potabilización, que serán explicadas en las siguientes secciones.

El programa fue desarrollado en su totalidad con el paquete de software RSLogix. Este software trabaja con programación en lenguaje escalera, permite la subdivisión en archivos o subrutinas para facilitar la programación además de múltiples herramientas para la depuración. Los cinco módulos principales se encuentran como archivos dentro del programa, sin embargo fue necesario la incorporación de nuevas subrutinas para simplificar la programación. Cada uno de estos archivos se encuentra explicado en el manual de mantenimiento (ver Apéndice A).

Por su parte todas las condiciones de operación del sistema de potabilización se encuentran en el manual de operación (ver Apéndice A).

5.4.1 Dosificación

El sistema de dosificación se divide en tres, según los químicos a dosificar:

- **Dosificación de Hipoclorito de Calcio:** depende de la cantidad de flujo de entrada de agua. Su concentración óptima se encuentra en el rango 0.2 y 0.5 mg/l de Cl_2 (cloro residual). Tiene doble función: elimina hierro suspendido y desinfecta el agua de microorganismos nocivos para la salud.
- **Dosificación de Sulfato de aluminio:** al igual que el hipoclorito depende del flujo de entrada. Su concentración óptima es de 20 mg/l. Se utiliza para la eliminación de residuos o partículas suspendidas en el agua como el hierro.
- **Dosificación de Carbonato de Sodio:** se usa para mantener neutro ($\text{pH}=7$) el grado de acides en el agua. La dosificación de este químico produce una elevación del pH para contrarrestar el efecto de disminución producido por el sulfato de aluminio.

La variación de la velocidad o frecuencia de dosificación varía proporcionalmente a la señal 4-20 producida en el módulo analógico de salida del PLC.

5.4.1.1 Dosificación de sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio

En vista que no se posee un sensor para medir la concentración de químicos para el sulfato de aluminio y el hipoclorito de calcio, se optó por diseñar un sistema de control a lazo abierto, que permitiera variar el flujo de la bomba de dosificación proporcionalmente al flujo de entrada (ver Figura 5.11). La dosificación de estos químicos es idéntica, excepto en la ecuación que relaciona el flujo de dosificación con respecto a la flujo de entrada debido a que la concentración requerida es diferente.

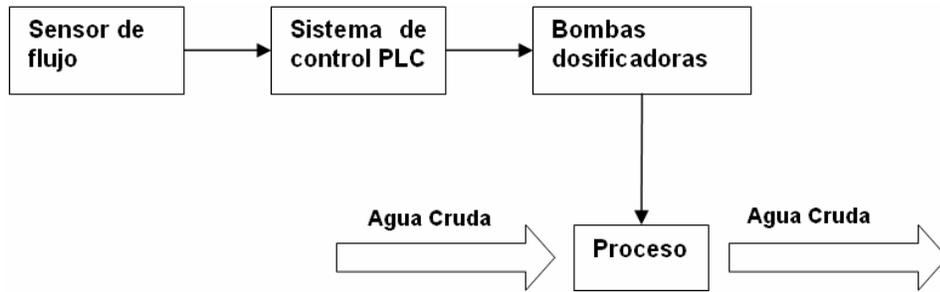


Figura 5.11 Sistema de dosificación a lazo abierto

La relacionan de los dos flujos, se obtiene de la Figura 5.12, de donde se despeja la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{C_d}{C_t} * F_t$$

Donde:

F_d= Flujo de la bomba de dosificación

C_d= Concentración del Tanque de dosificación

F_t= Flujo de entrada

C_t= Concentración en el tanque de agua cruda

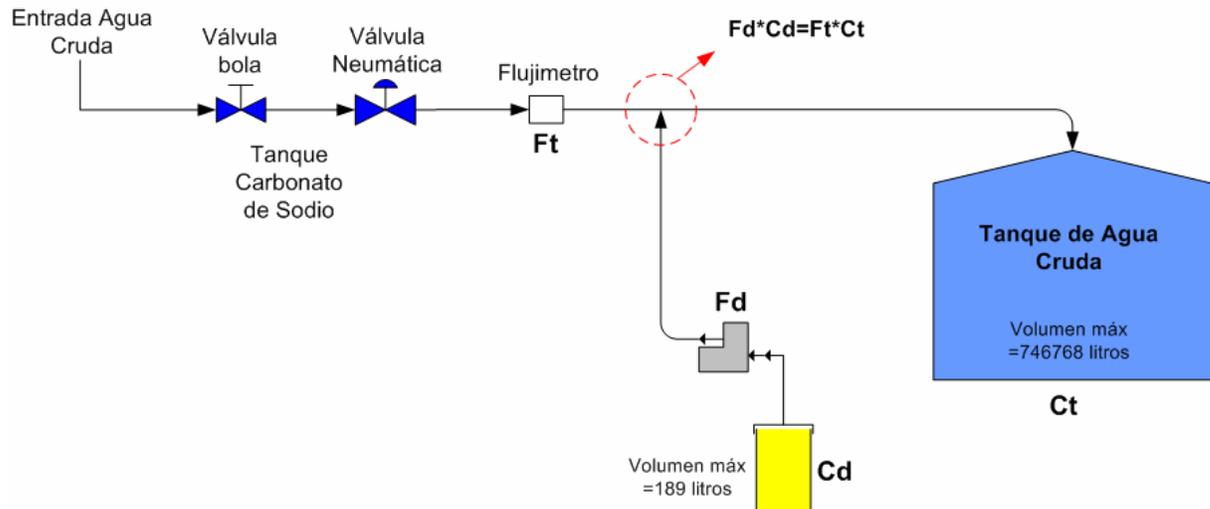


Figura 5.12 Obtención de la relación del flujo de dosificación versus flujo de entrada

Antes de ingresar la ecuación en el programa del PLC, era necesario ajustar la concentración de los químicos en los tanques dosificadores para que las bombas puedan dosificar un amplio margen del flujo de entrada.

Para el caso del sulfato de aluminio se estaba utilizando una bomba de la marca Pulsatron con una capacidad de bombeo máxima de 18.9 l/h; y para el sulfato de aluminio se utilizó una bomba Milton Roy con una capacidad máxima de bombeo de 6.1 l/h. Ambas bombas trabajan bajo el mismo principio, una señal 4-20 controla la frecuencia de impulsos (Stroke frequency, SF) y una perilla en la parte posterior de la bomba controla el largo de los impulsos (Stroke length, SL).

El cálculo de la concentración se hizo en base a puntos críticos de trabajo, mostrados en la Tabla 5.4. Se ajusto un flujo normal de trabajo Ft de 1500 litros por minuto (después de hacer un análisis del comportamiento del sistema en estas condiciones) y luego se ajusto la frecuencia y largo de bombeo, en porcentajes menores a su capacidad máxima, con el fin de mantener una frecuencia de bombeo relativamente alta, permitiendo disminuir la fluctuación de dosificación en el flujo de entrada, y para en caso de ser necesario, poder hacer un ajuste sin la necesidad de corregir la formula a nivel de software, únicamente variando la perilla de largo de frecuencia. Estas condiciones producen un flujo de bombeo máximo esperado (Fd^1) dependiente de la capacidad máxima, frecuencia y largo de bombeo, según la siguiente ecuación:

$$Fd^1 = Fd_{MAX} * SF * SL$$

La concentración se ajusto de tal forma que permitiera al menos 3 ciclos de llenado del tanque de agua cruda.

Tabla 5.4 Criterios tomados para el cálculo de la concentración en los tanques de dosificación

Químico	Tipo de Bomba	Capacidad máxima de bombeo (Ld/h)	Frecuencia de Bombeo (% Stroke frequency)	Largo de bombeo (% Stroke length)	Flujo de entrada (Lt/min)	Concentración $Cd=Ct*Ft/Fd^1$ (mg/Ld)
Sulfato de aluminio	Pulsatron	18.9	85	30	1500	294117.6471
Hipoclorito de calcio	Milton Roy	6.1	85	50	1500	12352,9412

Nota: Ld=Litro de tanque dosificador; Lt=Litro de tanque de agua cruda

La **Tabla 5.5** muestra la forma final de las ecuaciones, cuyas variaciones se observan en la Figura 5.13 para el sulfato de aluminio y Figura 5.14 para el hipoclorito de calcio. En estas graficas se ve claramente que las bombas de dosificación fueron diseñadas para trabajar hasta un flujo de entrada cercano a los 2000 l/min sin perder la concentración requerida.

Tabla 5.5 Obtención de la ecuación final para el cálculo del flujo de dosificación versus el flujo de entrada

Químico	Constante		Ecuación
	Ct (mg/Lt)	Cd (mg/Ld)	$Fd=(Ct/Cd)*Ft$
Sulfato de Aluminio	20	294117.6471	$Fd=(6.8*10^{-5})*Ft$
Hipoclorito de Calcio	0.35	12352,9412	$Fd=(2.833*10^{-5})*Ft$

Nota: Ld=Litro de tanque dosificador; Lt=Litro de tanque de agua cruda

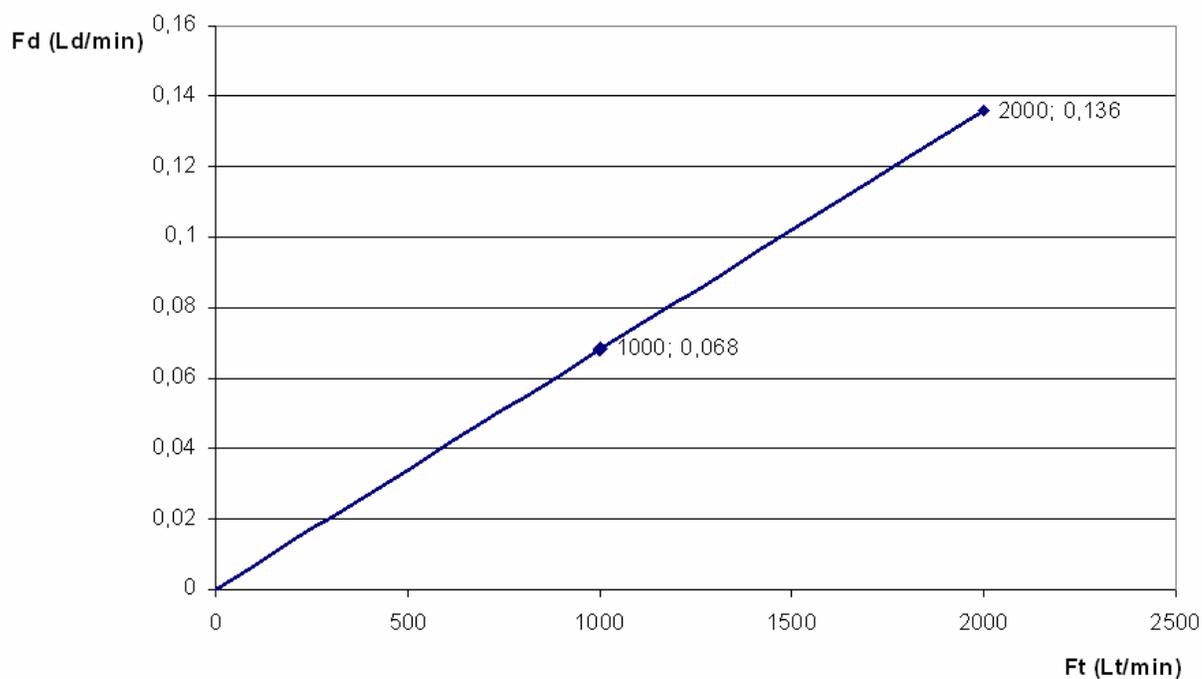


Figura 5.13 Variación del flujo de dosificación versus el flujo de entrada para la bomba de sulfato de aluminio

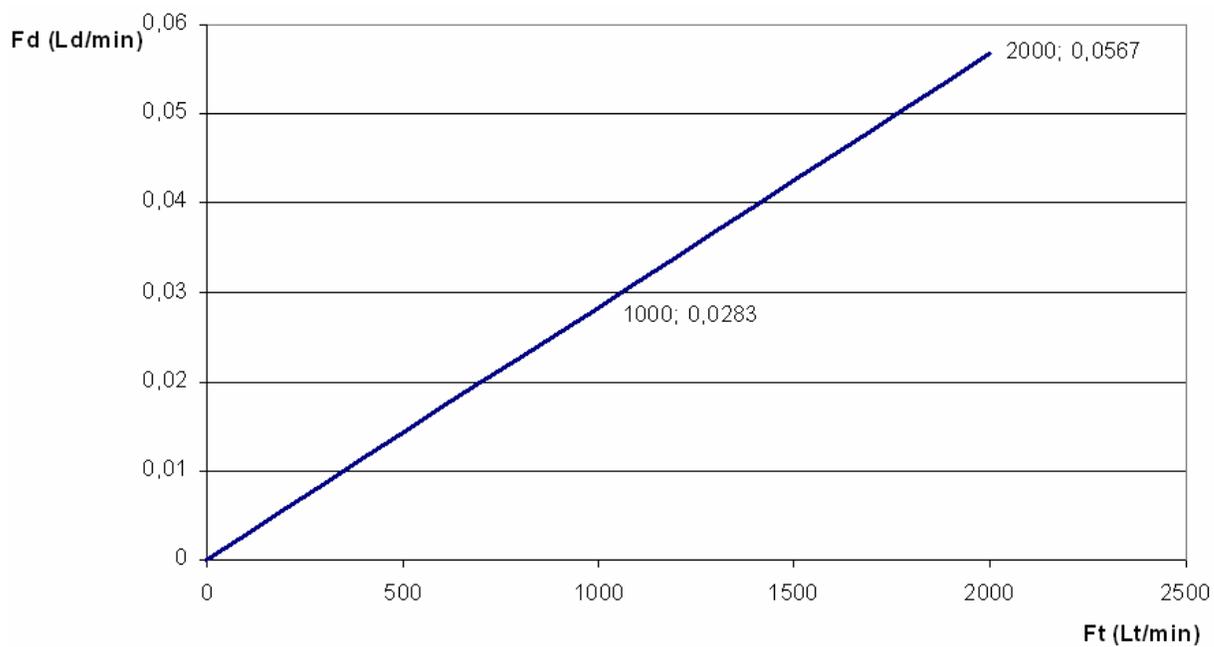


Figura 5.14 Variación del flujo de dosificación versus el flujo de entrada para la bomba de Hipoclorito de calcio

El diagrama de flujo para el control de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio se muestran en la Figura 5.15. Este sistema tiene dos modos de operación, Manual o Automático. En modo manual la activación se realiza desde el panel local y permite activar la bomba de dosificación con una velocidad máxima. En modo automático depende de las siguientes condiciones:

- Válvula abierta más de un 25%
- Flujo de entrada mayor a 300 l/min
- Parada de emergencia desactiva

En caso de que no se cumpla alguna de las condiciones anteriores se activara alguna alarma de aviso.

En caso de que la bomba líder falle inmediatamente el sistema activará la bomba auxiliar y enviará un mensaje de alarma.

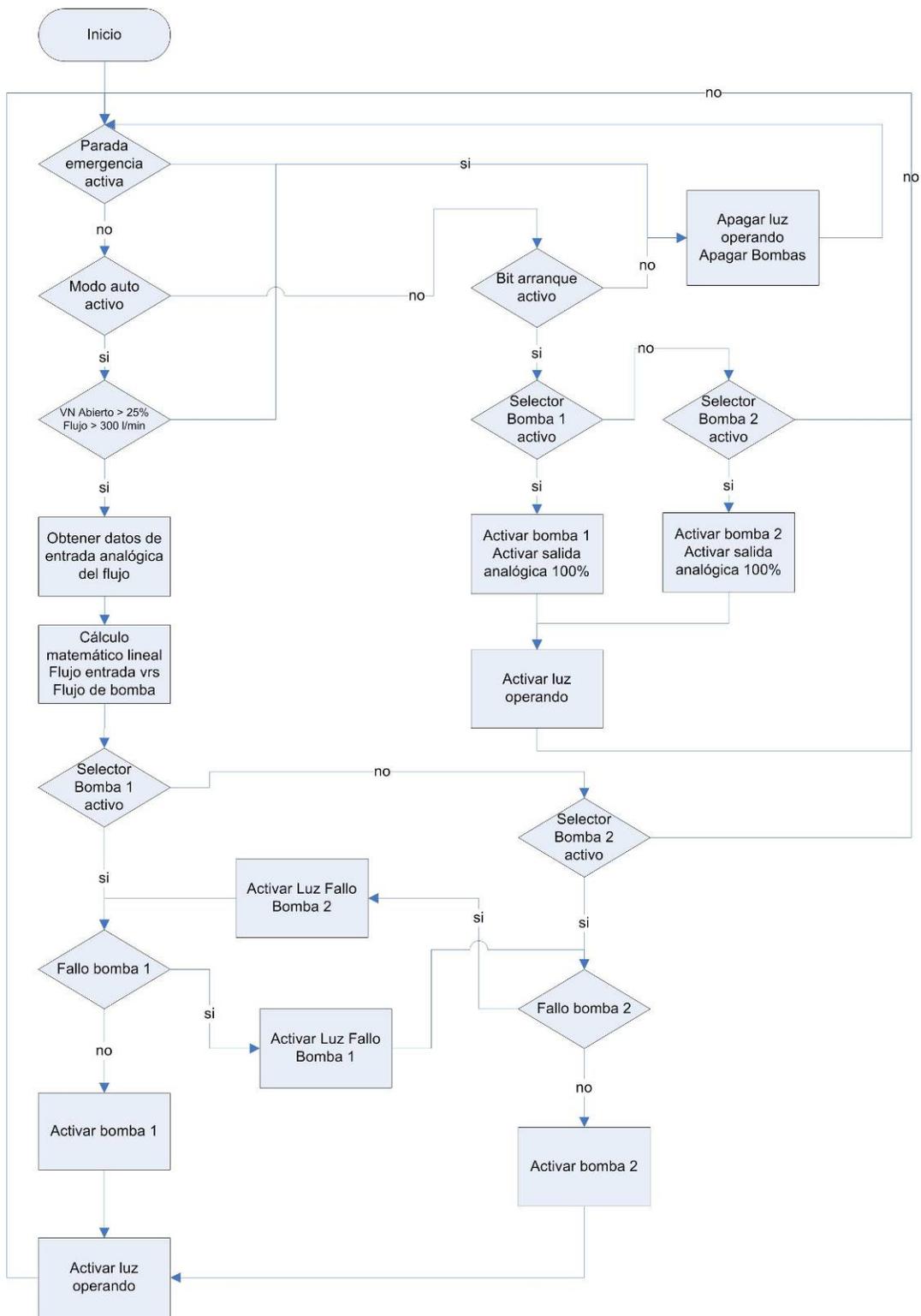


Figura 5.15 Diagrama de flujo para el control de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio

5.4.1.2 Dosificación de carbonato de sodio

Para controlar la bomba de dosificación de carbonato de sodio se utilizó un lazo de control cerrado, como se muestra en la Figura 5.16, con un PID (función que se encuentra dentro del juego de instrucciones para un SLC 500) como compensador del sistema.

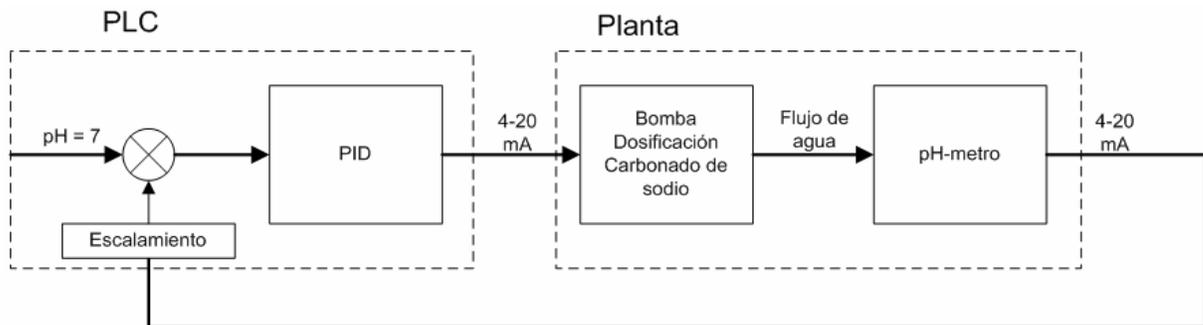


Figura 5.16 Sistema de control de pH a lazo cerrado

Dentro las principales características que el sistema debe cumplir, se destacan las siguientes:

- pH en estado estacionario debe permanecer en un rango de 6.8 a 7.2 (error aproximado, menor a un 3%). Mantener el pH lo suficientemente neutro, permite que los procesos químicos de potabilización se realicen de una forma más eficiente.
- El tiempo de establecimiento debe ser menor a 10 minutos. Este tiempo se basa en observaciones realizadas al sistema durante la puesta en marcha, tomando en cuenta que el proceso de dosificación y llenando del tanque de agua cruda tarda alrededor de 6 horas, por lo que el efecto de variación de pH durante este tiempo de estabilización es despreciable.
- Sobre impulso menor a un 15%. Este no afecta en gran medida el proceso de potabilización, pero se fijó este valor tomando en cuenta que la reacción del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor entre 6,5 y 8 (14, Hanna).

Para el procedimiento de sintonización se utilizó el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols descrito en la sección 3.4.4 del marco teórico.

Dentro de las variables más importantes que se requerían en la sintonización de la instrucción PID tienen:

- **Ganancia Kc:** es la ganancia proporcional con un rango de 0.1 a 25.5.
- **Restablecimiento Ti:** es la ganancia integral con un rango de 0.1 a 25.5 minutos por repetición.
- **Regimen Td:** es el término derivativo. El rango de ajuste es 0.01 a 2.55 minutos.
- **Actualización del lazo:** es el intervalo de tiempo entre los cálculos PID. La entrada es en intervalos de 0.01s. La regla general es introducir un tiempo de actualización del lazo diez veces más rápido que el periodo natural de la carga (determinado poniendo los parámetros Ti y Td a cero y luego incrementando Kc hasta que la salida comience a oscilar). Rango válido de 1 a 2.55.
- **Punto de ajuste SP:** es el punto deseado de la variable de proceso se ajusto para que equivaliera a un pH de 7. Como el escalamiento para PID tiene un rango de 0 a 16382, el valor de SP queda ajustado a 8191.

Para la obtención de la curva de reacción, se realizó un registro de las salidas de planta (pH) a partir de un escalón de un 0 a 100% de bombeo de carbonato de sodio en un proceso de dosificación normal. El resultado se muestra en la Figura 5.17 de donde se obtuvieron los parámetros para el método de la curva de reacción, que se muestran en la Tabla 5.6. Siguiendo con el método, las constantes de sintonización para el PID se obtuvieron por medio de un simple cálculo con los valores de la Tabla 5.6, estos resultados se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.6 Parámetros del método de la curva de reacción

Parámetro	Valor
t0	3.00 s
t1	16.60 s
t2	36.30 s
y0	2.94 V
y ∞	3.61 V
u0	1.05 V
u ∞	5.37 V

Tabla 5.7 Parámetros de sintonización para el PID

Parámetro	Valor
Kc	11.21
Ti	0.45
Td	0.11

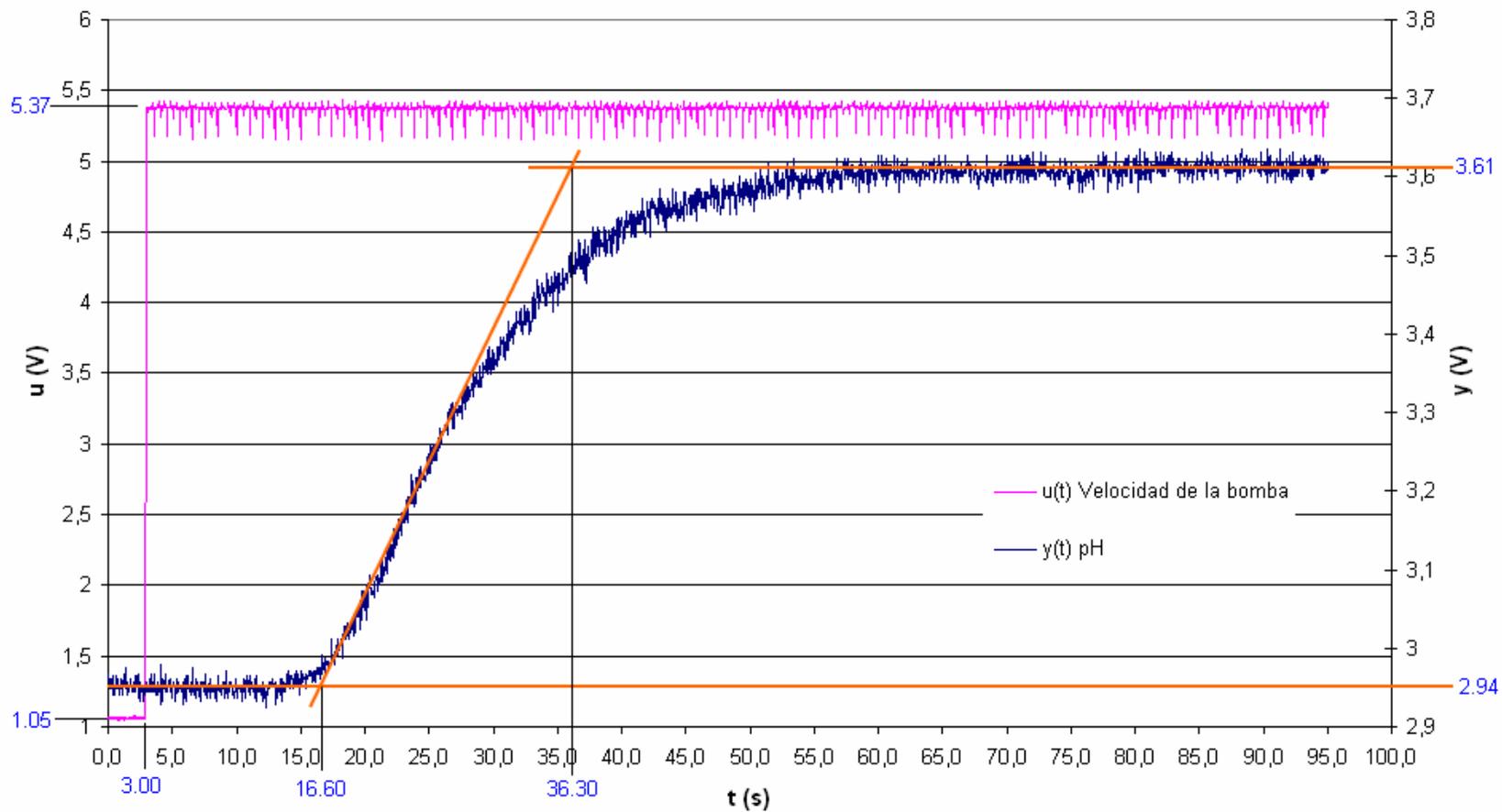


Figura 5.17 Obtención de parámetros para el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Los valores finales de ajuste obtenidos para el PID se muestran en la Figura 5.18. Estos resultados se obtuvieron después de realizar varias pruebas y ajustes a los parámetros obtenidos del método de la curva de reacción, para que la planta se comportara según lo requerido.

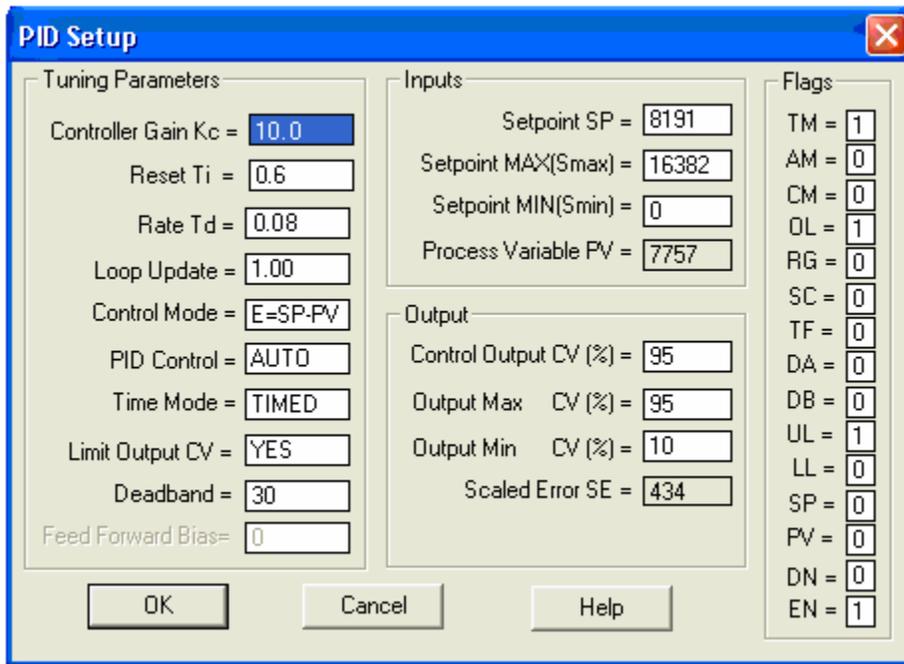


Figura 5.18 Parámetros de ajuste para el PID

Comprobación del regulador obtenido por el método de la curva de reacción

Como forma de comprobación, se obtuvo la función de transferencia de la planta por medio del método de identificación de sistemas⁵, el cual permite obtener el modelado de un sistema a partir de datos experimentales. Estos datos se obtuvieron de la curva de reacción con un tiempo de muestreo de 0.04s, de donde, se adquirieron los parámetros del modelo, mediante la estructura paramétrica OE (Output Error) la cual fue la que mejor se ajustó a la respuesta de entrada y salida experimental (ver Figura 5.19), con un 90% de aproximación.

⁵ El indentificador utilizado fue la herramienta Ident de Matlab v 6.5

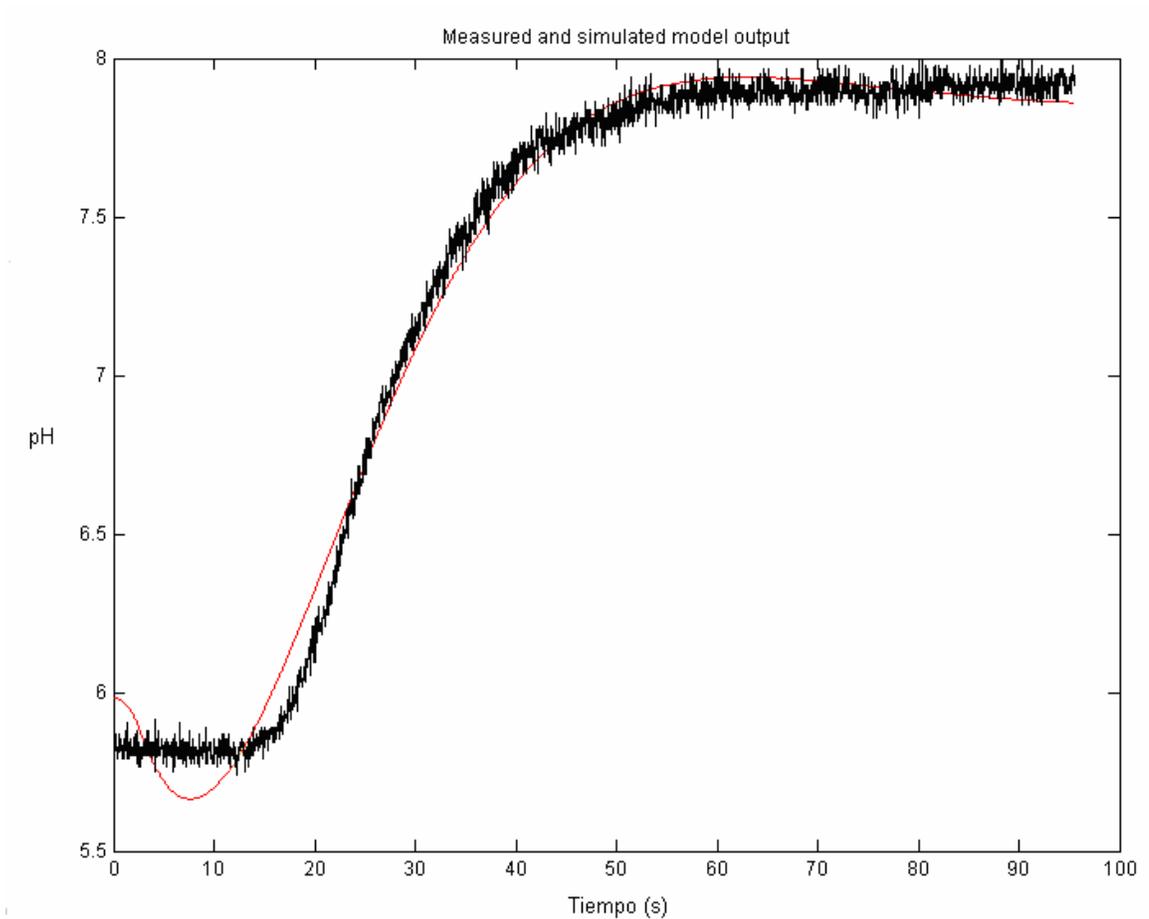


Figura 5.19 Trayectoria aproximada mediante la parametrización OE con un 90% de ajuste

Según la parametrización anterior se obtuvo la función de transferencia que se muestra a continuación:

$$G(z) = \frac{7.803e^{-7}z}{z^2 - 1.995z + 0.9954} \rightarrow T = 0.04$$

A partir de la planta $G(z)$ se obtiene el lugar de las raíces de la Figura 5.20, en donde se observa un sistema dentro de los márgenes de la estabilidad.

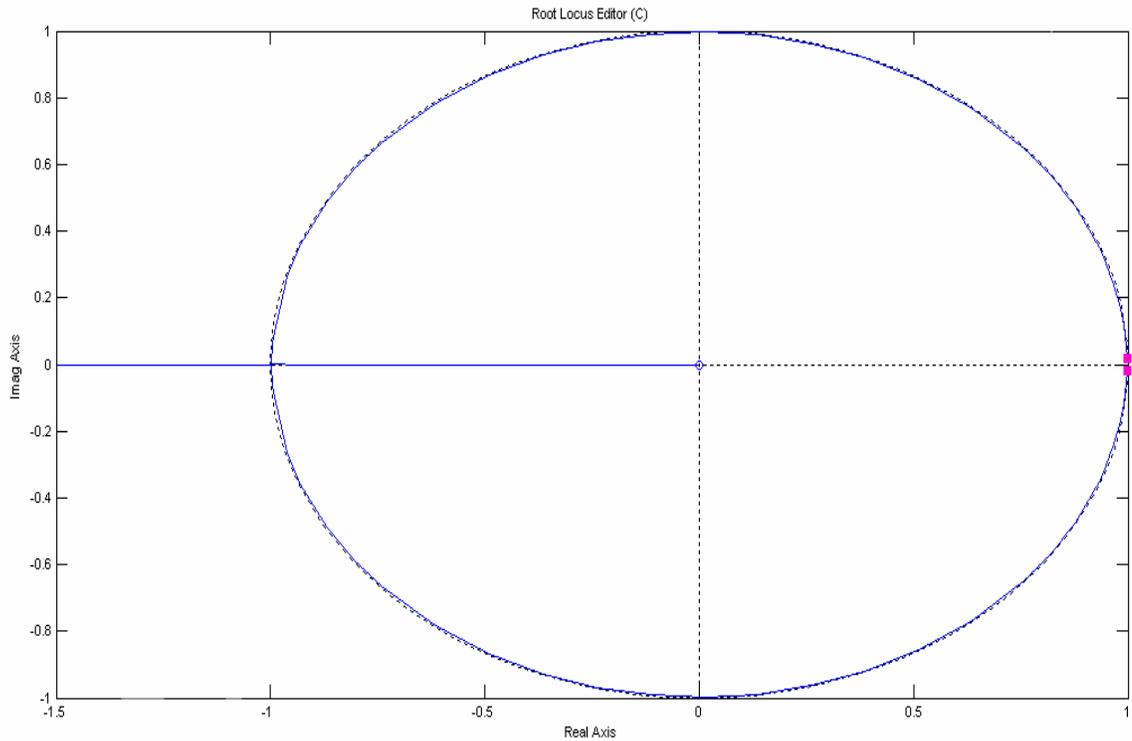


Figura 5.20 Lugar de las raíces para la planta $G(z)$

A partir de la forma clásica de un PID se aproxima la integral por el método del trapecio, y la derivada por el método de diferencia hacia atrás, según lo desarrollado en el capítulo 5 (24, UNP), apartado, “Diseño de controladores digitales por aproximación de controladores analógicos”:

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

El algoritmo PID discreto queda:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 z^2 + q_1 z + q_2}{z(z-1)} \quad \text{donde:} \quad \begin{aligned} q_0 &= K_p \left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right) \\ q_1 &= -K_p \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right) \\ q_2 &= \frac{K_p T_d}{T} \end{aligned}$$

A partir de los parámetros obtenidos para el PID por medio del método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols ($K_p=10$, $T_i=0.6$ y $T_d=0.08$), se obtiene el siguiente PID discretizado:

$$K(z) = \frac{30.33z^2 - 49.67z + 20}{z(z-1)} \rightarrow T = 0.04$$

Aplicando el compensador $K(z)$ a la planta $G(z)$ se obtiene el lugar de las raíces mostrado en la Figura 5.21, de donde se observa claramente la acción provocada por el compensador $K(z)$.

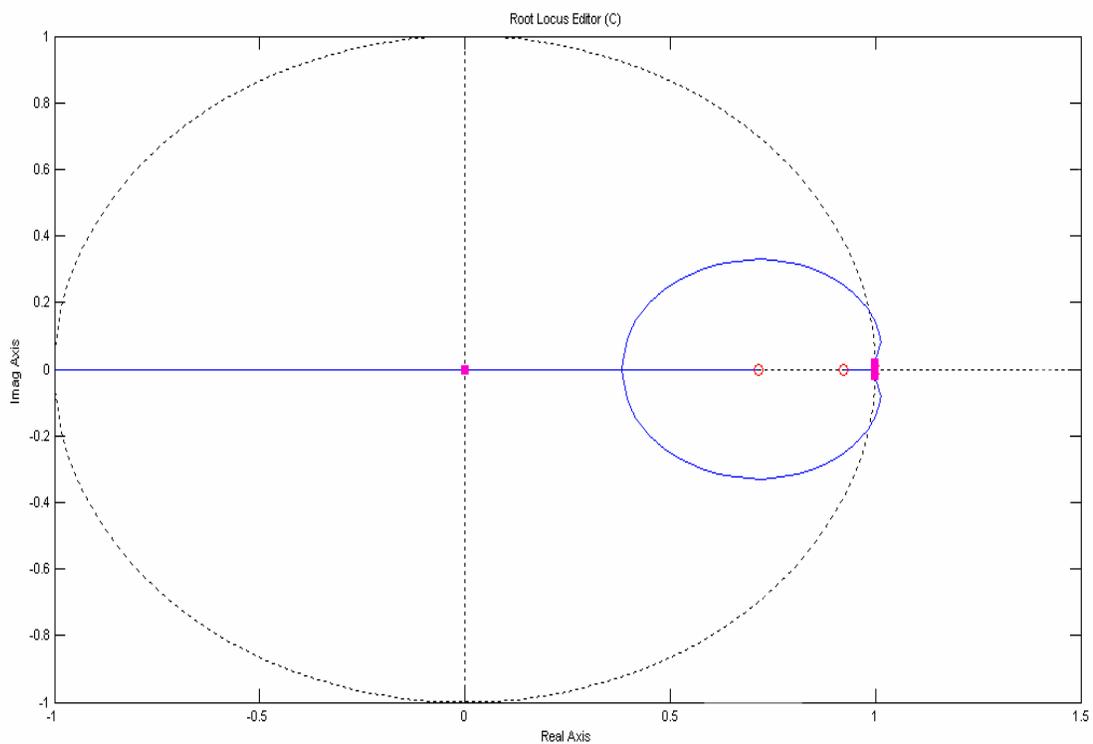


Figura 5.21 Lugar de las raíces con compensador

En la Figura 5.22, se muestra una ampliación cerca de los polos dominantes en donde los puntos de operación se encuentran dentro del sistema estable.

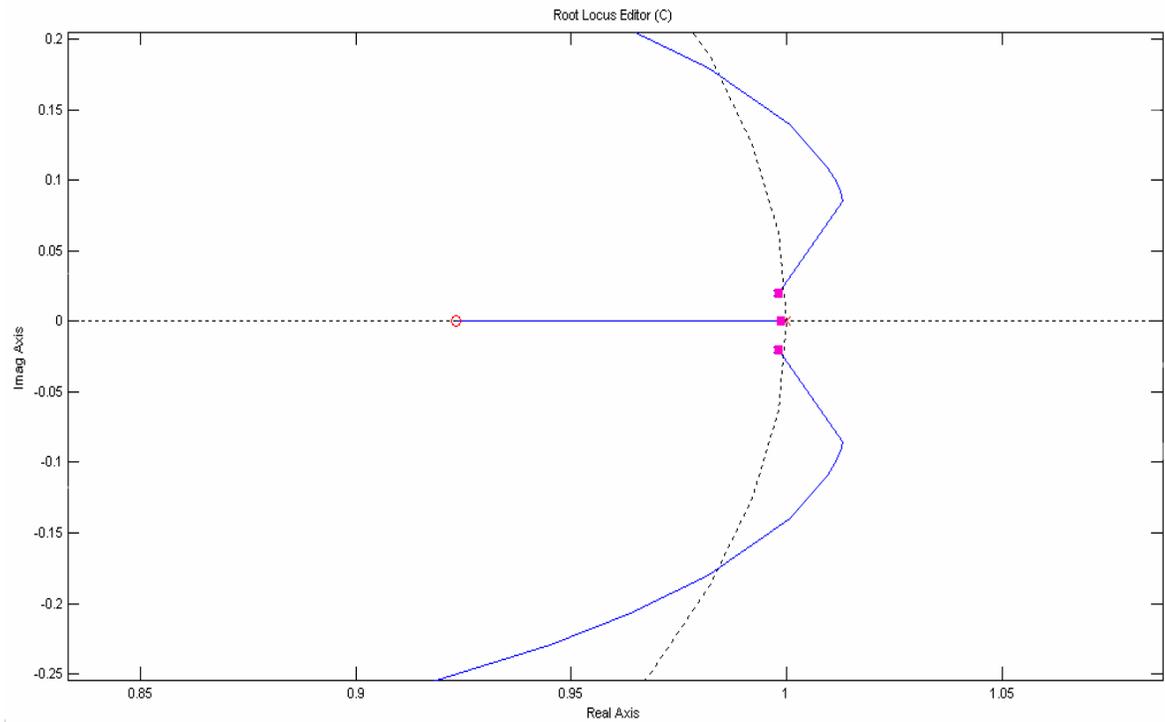


Figura 5.22 Ampliación del lugar geométrico de las raíces

La respuesta ante un escalón unitario se muestra en la Figura 5.23, el cual demuestra que el compensador obtenido por el método de Ziegler-Nichols cumple con todos los requisitos de diseño para el funcionamiento del sistema, con un tiempo de establecimiento menor a 3 min, un sobre impulso de 0% y un error de estado estacionario de 0%.

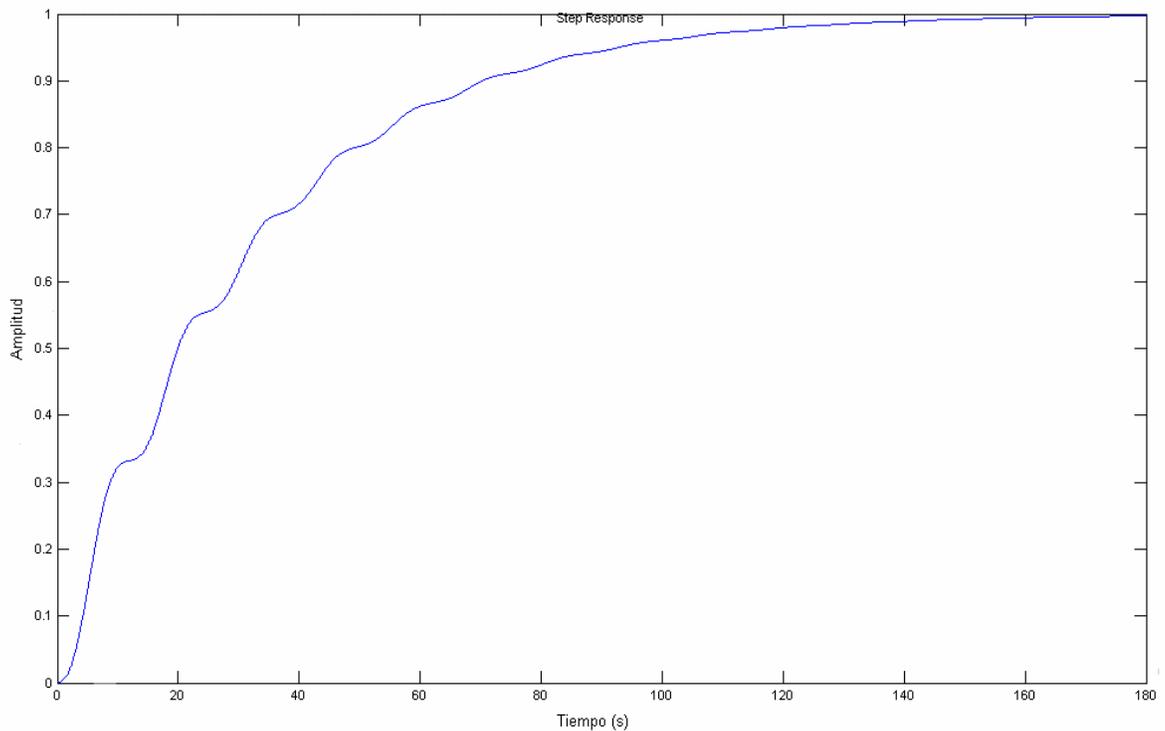


Figura 5.23 Respuesta ante un escalón unitario para la planta con compensador

El diagrama de flujo de la Figura 5.24 muestra el procedimiento general utilizado para controlar la bomba de carbonato de sodio. El procedimiento es similar para el control de las bombas de dosificación de sulfato de aluminio y hipoclorito de calcio, solo que para este caso el cálculo o control de la bomba lo realiza el PID.

La bomba comienza a funcionar en modo automático, si se produce alguna de las siguientes condiciones:

- Válvula abierta más de un 25%
- Flujo de entrada mayor a 300 l/min
- Parada de emergencia desactiva

Si no se produce alguna de las condiciones anteriores la bomba se desactiva.

Una novedad de este diagrama de flujo que difiere con las otras bombas de dosificación es que posee un sistema de alarma que permite detectar problemas en su funcionamiento aparte de un problema eléctrico:

- **Bajo carbonato:** baja dosificación de carbonato de sodio. Se produce cuando la bomba de dosificación de carbonato de sodio esta trabajando a un máximo de velocidad y el pH es menor de 6.6 durante más de 10 minutos. Esto puede deberse principalmente a un problema en la bomba de dosificación de carbonato de sodio, ya sea por obstrucción en la línea de dosificación o por problemas en el diafragma de la bomba.
- **Alto carbonato:** alta dosificación de carbonato de sodio. Se produce cuando la bomba de dosificación de carbonato de sodio esta trabajando a un mínimo de velocidad y el pH se encuentra por encima de 7.4 durante más de 10 minutos. Esto puede deberse principalmente a un problema de obstrucción en la bomba de dosificación de sulfato de aluminio. Esto es posible ya que el margen mínimo de bombeo para la bomba de dosificación de carbonato es de un 10%.

En el caso de la activación manual queda a criterio del operador, podría activar la bomba incluso sin haber flujo de entrada de agua cruda. Para mayor detalle de operación y fallas ver el manual de operación.

Continuación de la figura anterior...

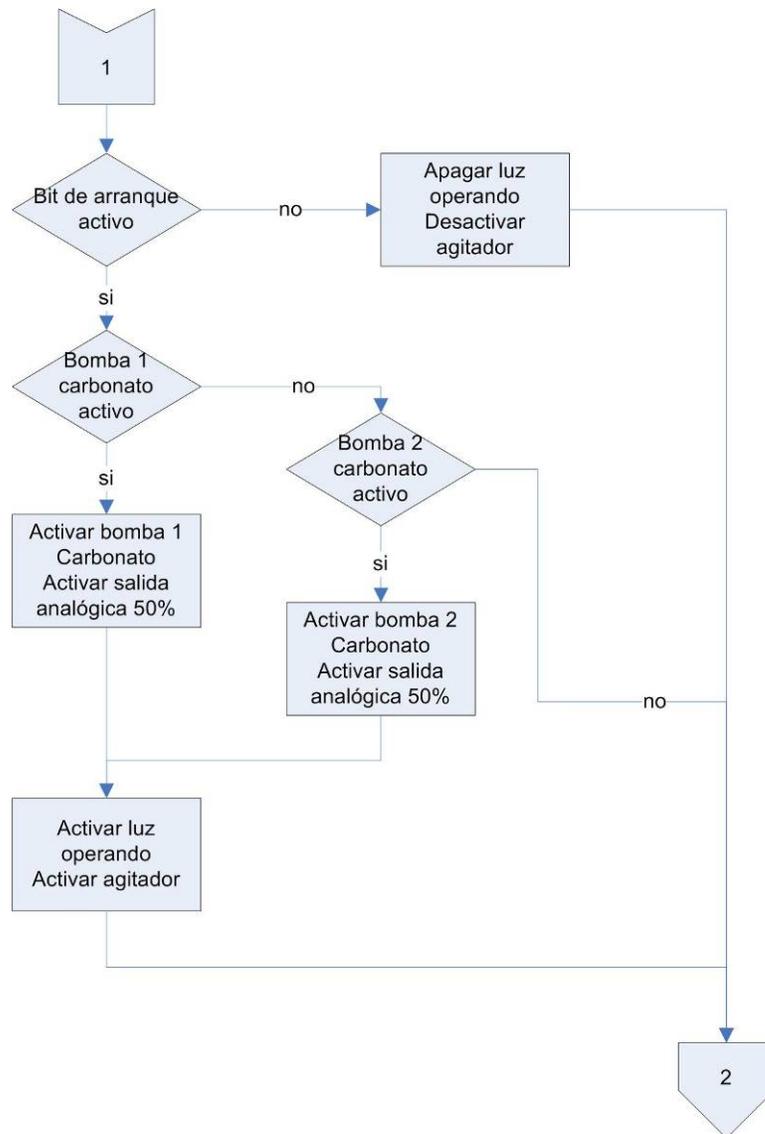


Figura 5.25 Diagrama de flujo para el control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio (continuación)

Continuación de la figura anterior...

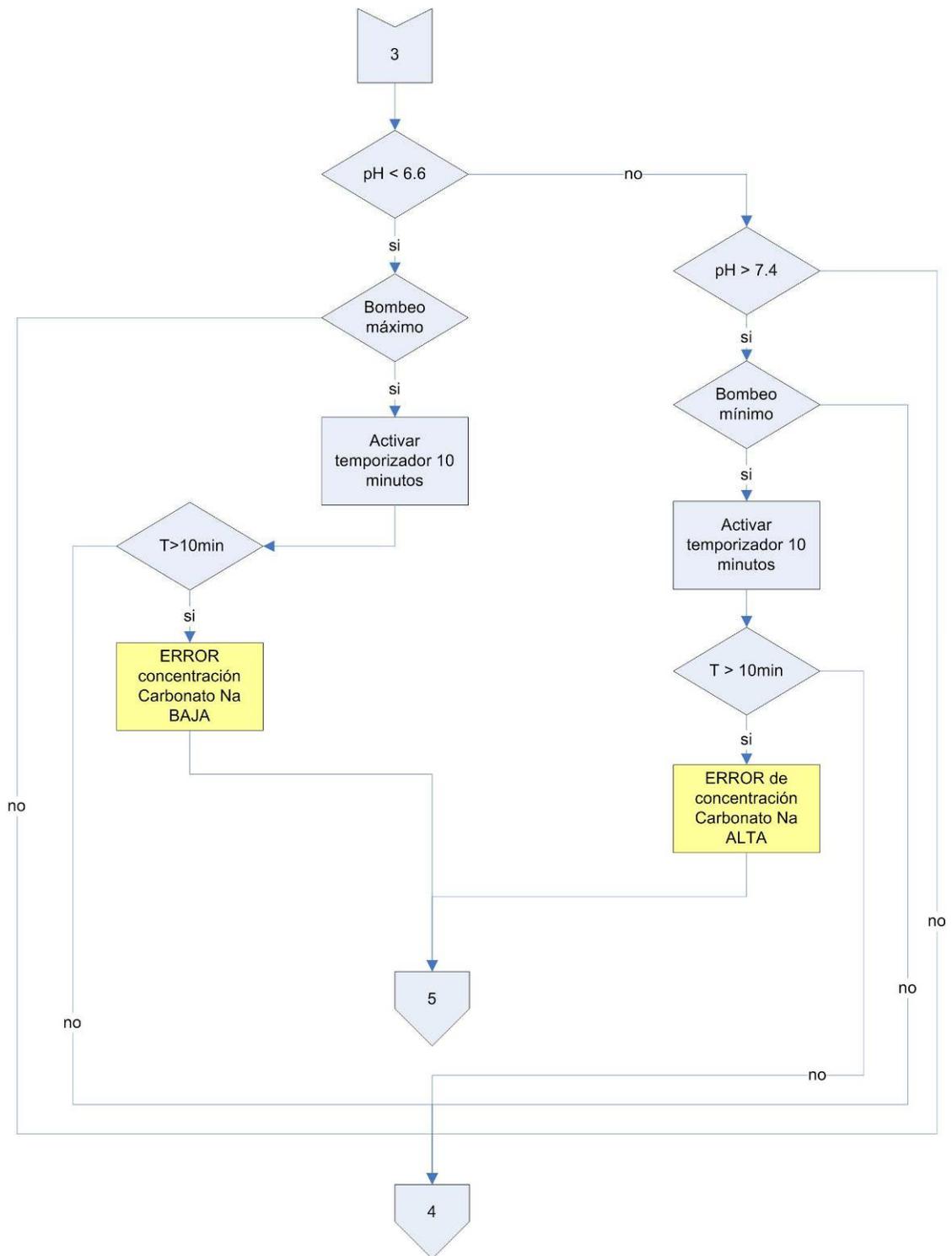


Figura 5.26 Diagrama de flujo para el control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio (continuación)

5.4.2 Control de nivel del tanque de agua cruda

El tanque de agua cruda (TAC) almacena el agua cruda dosificada, el cual debe pasar por un proceso cíclico de renovación. Debido a que este proceso depende de la acción de los químicos, se requiere que el agua dosificada sea consumida en su totalidad antes de volver a empezar un nuevo ciclo.

El nivel del TAC depende del consumo o demanda de agua que requiera el tanque de agua potable (TAP). En la Figura 5.27 se muestra el diagrama de flujo para controlar el nivel.

La válvula neumática (VN) la cual permite el control del nivel del TAC, posee dos modos de operación *Manual* y *Automática* estos se escogen en selector colocado en el panel local.

En el modo manual la válvula se abre o se cierra únicamente presionando el botón *Abrir/Cerrar* que se encuentra justo debajo del selector. Hay que tomar en cuenta que en este modo el control queda exclusivamente a criterio del operador. Por lo que puede ocurrir que el sistema no inicie el proceso de llenado o se sobrepase el límite superior hasta llegar a desbordamiento.

En el modo automático la apertura y cierre de la válvula depende de las condiciones que el sistema tenga en ese momento las cuales se describen a continuación.

La válvula neumática se abre dependiendo de dos condiciones:

- Cuando el transmisor de nivel indica vacío (<60cm). Como se muestra en la Figura 5.29, el nivel de vacío depende del nivel de las bombas de agua cruda.
- Cuando el volumen del TAC no es suficiente para volver a llenar la siguiente solicitud del tanque de agua potable en el momento que este se encuentra en su punto máximo. En otras palabras, si el volumen es menor que 80 m³ cuando el TAP se encuentra en su nivel máximo. Esta condición garantiza que el tanque de agua potable (TAP) este lleno cuando comience un nuevo ciclo de llenado del tanque de agua cruda, precaviendo que el TAP no se vacíe durante las 11 horas que dura el proceso de dosificación.

- No se abrirá si se tiene alguna de las condiciones de cierre.

La válvula neumática se cierra según las siguientes condiciones:

- Cuando el transmisor de nivel indica máximo (>237cm). Ver Figura 5.29.
- Señal de alarma de bajo nivel, en alguno de los tanques dosificadores
- Cuando el pH sea menor que 6.6 o mayor que 7.4 durante mas de 10 minutos. Esto pone en evidencia algún desperfecto en la bomba de carbonato de sodio o sulfato de aluminio.
- Cuando se produce un fallo por circuito abierto o fallo de sub o sobre rango en las señales 4-20 de los siguientes instrumentos: pH-metro, flujímetro y retorno de válvula neumática.
- Cuando se queman los protectores de sobre corriente de alimentación, en las dos bombas de un mismo químico dosificador.
- Paro de emergencia activo.

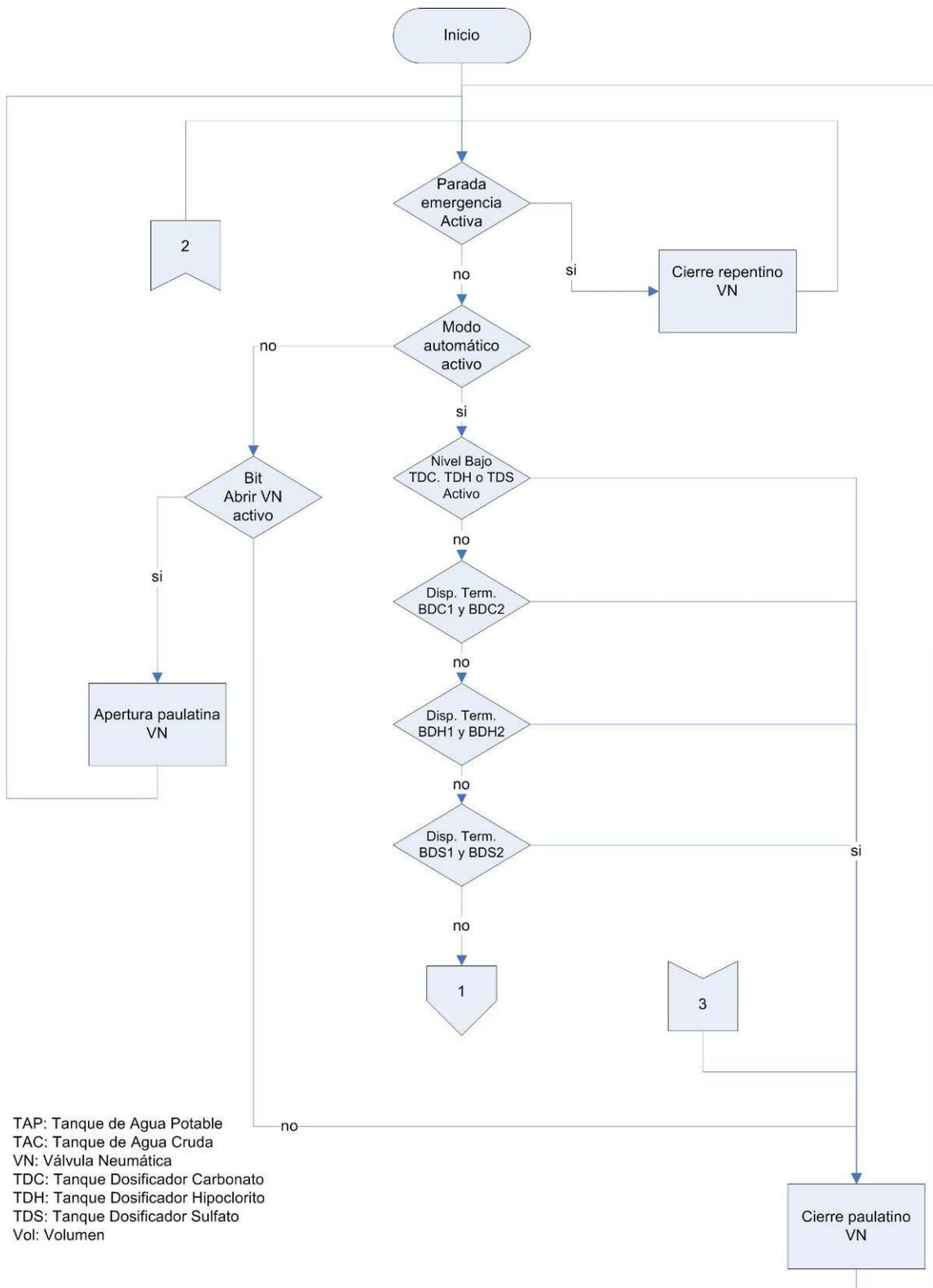


Figura 5.27 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua cruda

Continuación de la figura anterior...

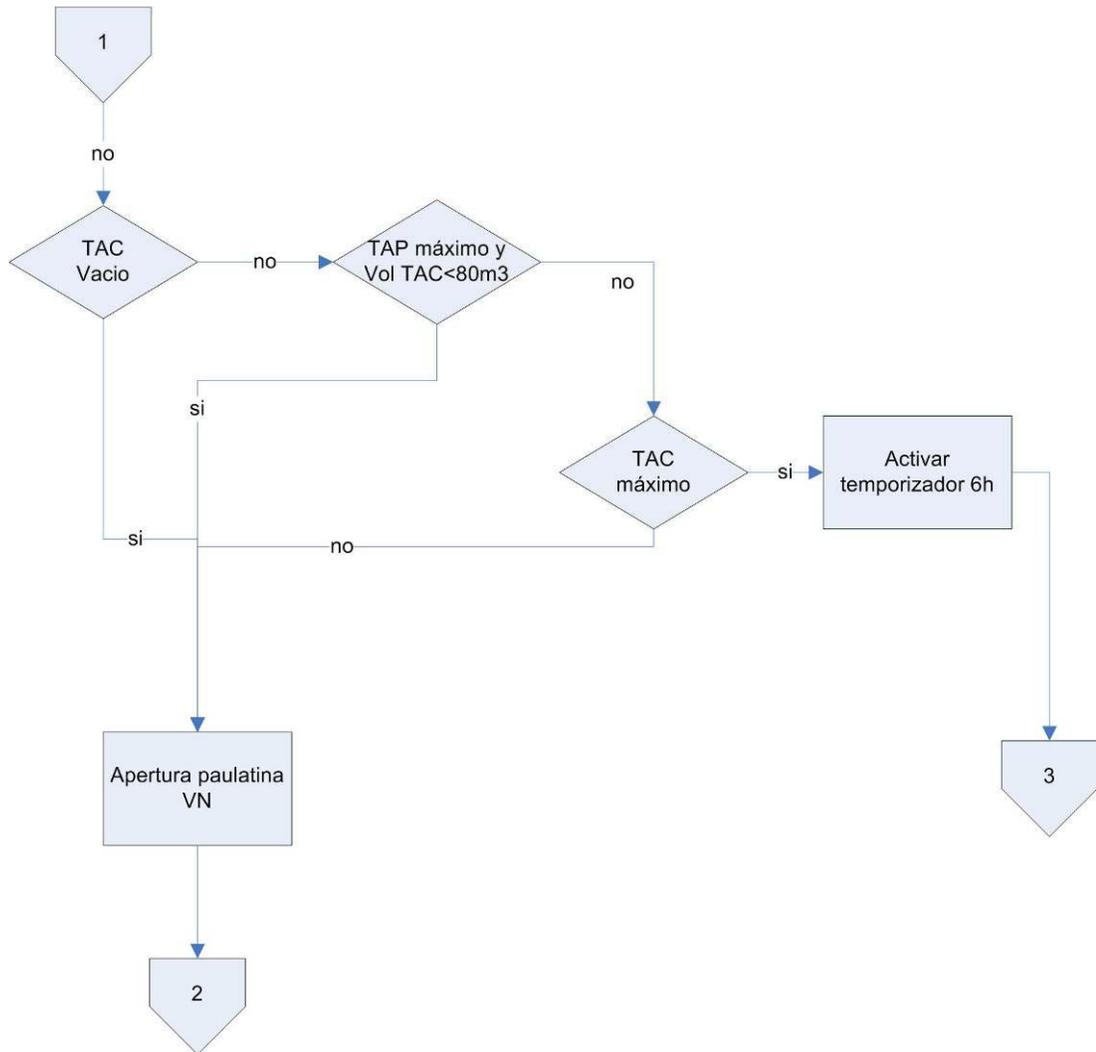


Figura 5.28 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua cruda (continuación)

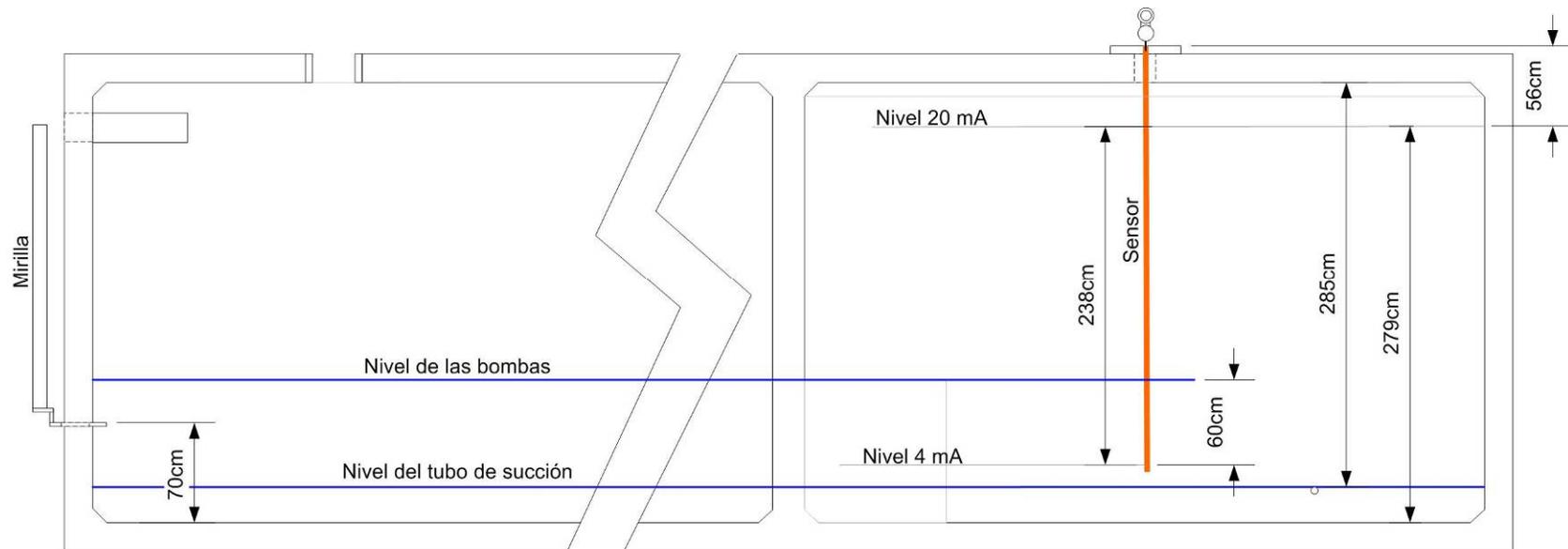


Figura 5.29 Ubicación del sensor de nivel capacitivo en el tanque de agua cruda

5.4.3 Control del Filtro de Lecho Múltiple (FLM)

En la Figura 5.30 se muestra el diagrama de flujo del filtro de lecho múltiple, este control se activa cada vez que empieza un ciclo de limpieza o retrolavado. El control del filtro de lecho múltiple (FLM) se encuentra en el panel principal. Tiene dos modos de operación Manual y Automático.

En el modo manual se puede activar el ciclo de retrolavado pulsando el botón de *Arranque/Paro*, esto da inicio al proceso, el cual una vez iniciado, no se puede detener excepto con el paro de emergencia de las bombas de agua cruda.

En modo automático el ciclo de retrolavado se realiza una vez diaria a las 9 am y al igual que en el modo manual solo se puede detener con el paro de emergencia, siempre y cuando el nivel TAP no indique vacío (<60 cm).

El proceso de retrolavado consiste en 4 etapas:

- Retrolavado (15 minutos)
- Pausa (15 minutos)
- Enjuague (5 minutos)
- Servicio

La presión de entrada y salida en la válvula multipuerta debe estar en el rango de 15 a 25 psi para un correcto funcionamiento.

El paro de emergencia de las bombas de agua cruda detiene el proceso de retrolavado.

Si por algún motivo el ciclo de retrolavado es interrumpido es probable que la válvula multipuerta quede en una posición incorrecta, para volverla a colocar en posición de Servicio es necesario activar las bombas de agua cruda en modo manual y cerrar paulatinamente la válvula manual que se encuentra en la salida del drenaje, hasta que el problema quede resuelto.

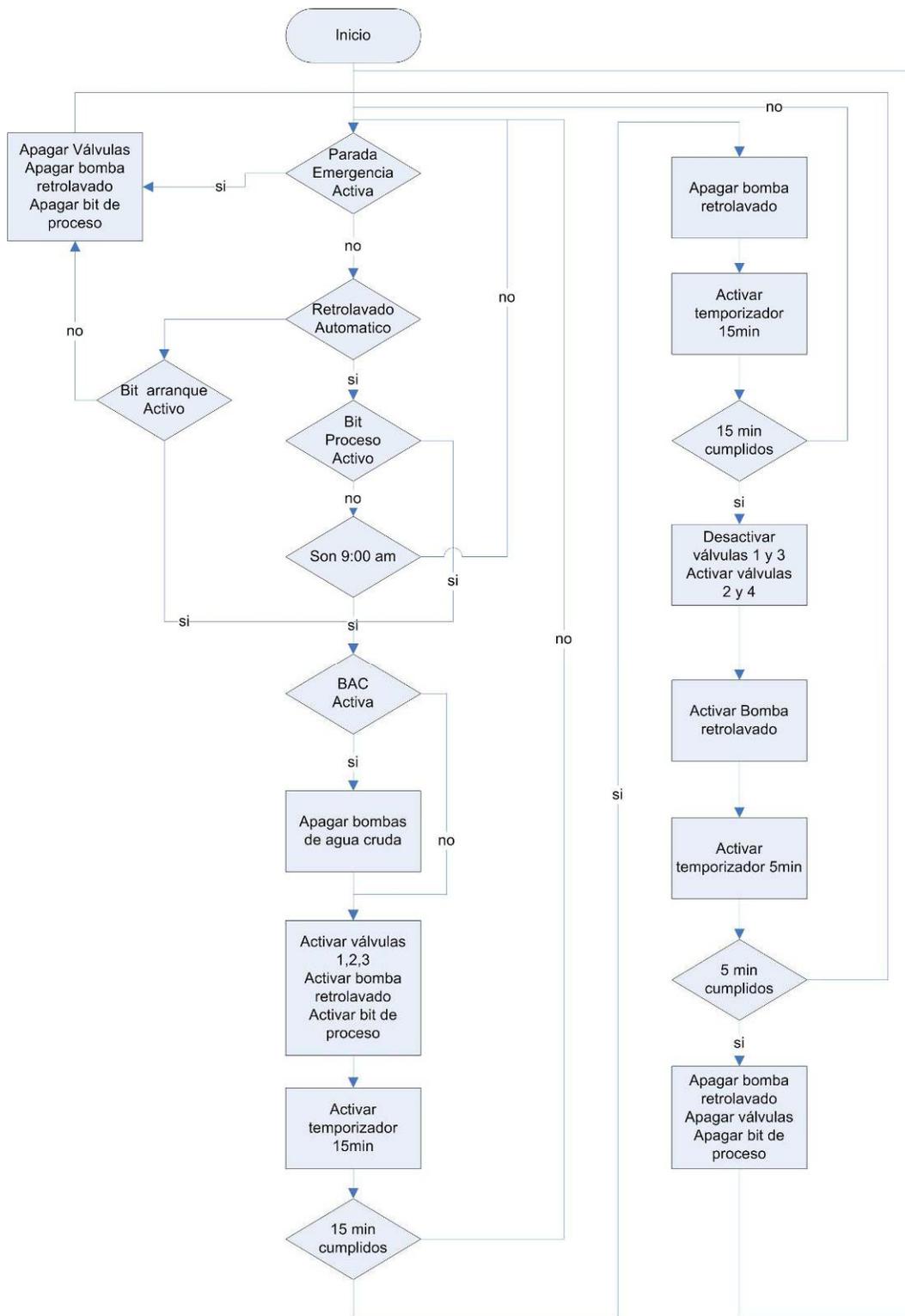


Figura 5.30 Diagrama de flujo para el control del filtro de lecho múltiple

5.4.4 Control del nivel del tanque de agua potable

Este nivel es sentido por el transmisor de nivel del TAP, el cual activa o desactiva las bombas de agua cruda dependiendo de las condiciones que se presenten en el sistema. Las bombas de agua cruda poseen dos modos de operación *Manual* o *Automático* (ver diagrama de flujo en Figura 5.31) los cuales se seleccionan en el selector escogido para este propósito en el panel principal.

En el modo manual se puede arrancar o parar una bomba pulsando el botón *Arranque/Paro*, la bomba escogida depende de cual de las dos bombas disponibles se encuentre seleccionada. En este modo el control de las bombas queda a criterio del operario por lo que se debe tener cuidado de que el nivel del TAC no se encuentre por debajo de lo normal y que las tuberías se encuentren debidamente purgadas. Al igual que en TAC, puede ocurrir que el sistema no inicie el proceso de llenado o se sobrepase el límite superior hasta llegar a desbordamiento.

En modo automático es el sistema quien define cuando arrancar o parar las bombas dependiendo de diferentes condiciones que se definen a continuación.

Condiciones de arranque:

- Cuando el nivel del TAP es mínimo (<184cm). El TAP trabaja con pequeñas variaciones en su nivel (50 cm) para garantizar el suministro de agua aún cuando ocurra algún desperfecto grave en el sistema.

Condiciones de paro:

- Cuando el nivel del TAP es máximo (>234cm).
- Nivel TAC indica vacío (<60). Como lo muestra la Figura 5.33, 60 cm es el nivel mínimo sentido por el transmisor para que no se produzcan presiones negativas, en el proceso de succión realizado por las bombas de agua de servicio.
- Cuando se produce un fallo en el transmisor de nivel TAP.
- Cuando inicia el proceso de retrolavado.

- Cuando se produce un fallo en ambas bombas de agua cruda.
- Paro de emergencia activo.

En modo automático, las bombas de agua cruda se alternan para disminuir el trabajo y aumentar su vida útil. Sin embargo, si el tanque de agua potable se encuentra vacío se recomienda llenarlo de forma manual y alternar manualmente de una bomba a otra para completar el llenado y así no sobre utilizar una sola bomba para tal propósito.

Continuación de la figura anterior...

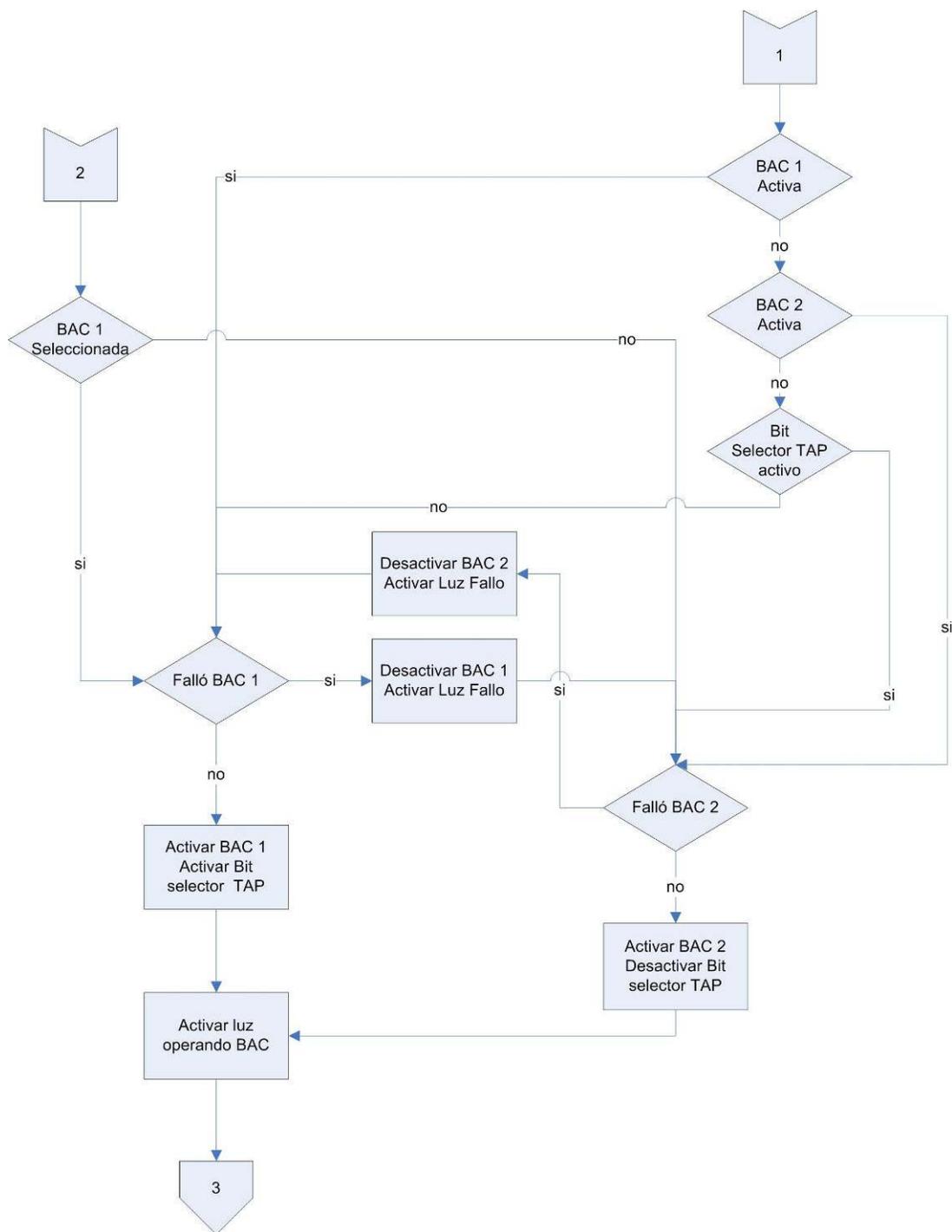


Figura 5.32 Diagrama de flujo para el control del nivel del tanque de agua potable (continuación)

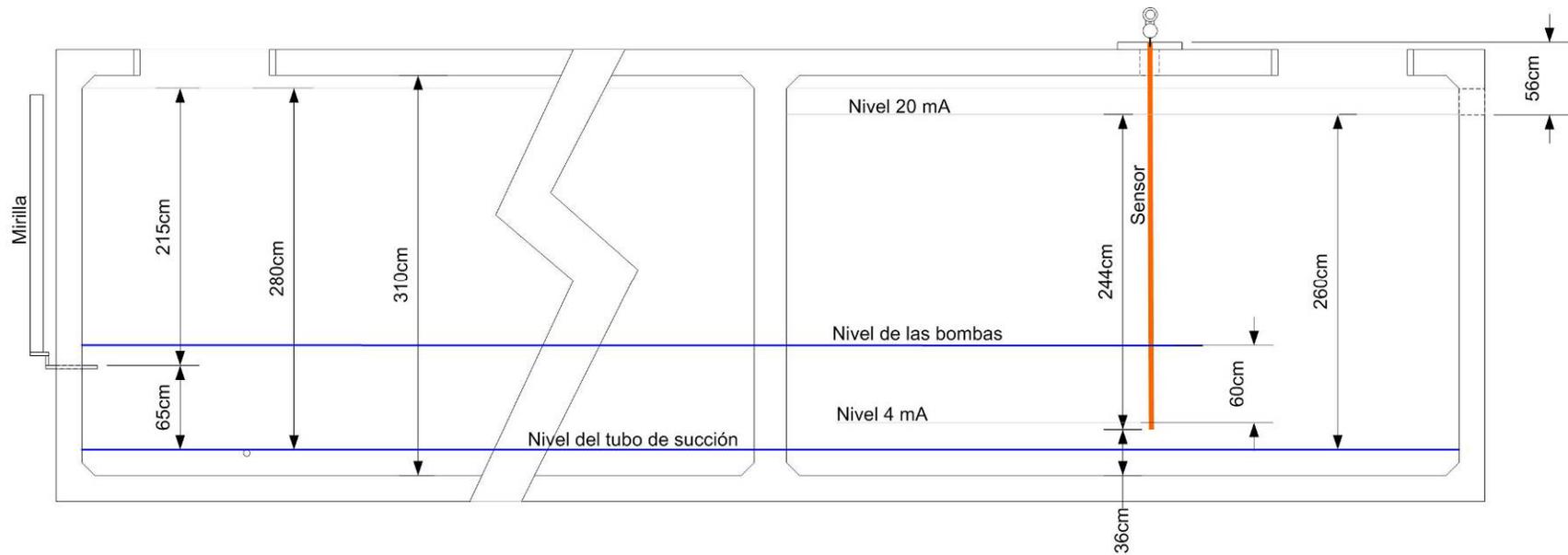


Figura 5.33 Ubicación del sensor de nivel capacitivo en el tanque de agua Potable

5.4.5 Control de nivel del tanque hidroneumático

5.4.5.1 Nivel

Este nivel es indicado por el transmisor de nivel por presión diferencial del tanque hidroneumático (TH) el cual dependiendo de las condiciones del sistema, activa o desactiva las bombas de agua de servicio. Estas bombas al igual que las bombas de agua cruda poseen dos modos de operación *Manual* y *Automático* los cuales cambian según el selector ubicado en el panel principal (ver diagrama de flujo en la Figura 5.34).

En el modo manual, se puede activar o desactivar una de las bombas, según la bomba seleccionada, presionando el botón *Arranque/Paro*. Es importante recordar que en el modo manual, el arranque solo lo puede provocar el operario presionando el botón antes mencionado, sin embargo, por motivos de seguridad en este modo también funciona el punto de parada automático, que corresponde a un nivel máximo (>90cm).

En el modo automático, las condiciones de arranque y pare depende del sistema.

Condiciones de arranque de las bombas de agua de servicio:

- Cuando el nivel TH indica mínimo (<60cm)
- Condiciones de pare de las bombas de agua de servicio:
- Cuando nivel TH indica máximo (>90cm)
- Cuando nivel TAP indica vacío (<60cm)
- Por fallo en el transmisor de nivel TH
- Cuando se produce un fallo en ambas bombas de agua de servicio
- Paro de emergencia activo

En modo automático, al igual que las bombas de agua cruda, las bombas de agua de servicio se alternan para disminuir el trabajo y aumentar su vida útil.

5.4.5.2 Presión

En el tanque hidroneumático existe también un transmisor de presión el cual indica constantemente la presión de aire que se encuentra dentro tanque. En caso de pérdida de presión existe una electro-válvula que permite el ingreso de aire asía el tanque, su activación depende de dos condiciones:

- El nivel de agua TH se superior a 85 cm
- Y que la presión sea menor que 3.5 bar
- La electro-válvula se desactiva cuando:
 - La presión es mayor que 4 bar
 - Nivel TH es menor que 85 cm
 - Fallo en el transmisor de presión
 - Paro de emergencia de las bombas de agua de servicio

Hay que tomar en cuenta que si el nivel permanece inferior a 85 cm y existe una fuga de aire, la presión seguirá bajando y el tanque no llegara a recargarse de aire. En todo caso esto es una situación anómala ya que no deberían existir fugas.

5.4.5.3 Drenaje

La válvula de drenaje es encargada de eliminar residuos que se acumulan en fondo del tanque. Esta se activa de forma automática dos veces por día, a las 8 am y a las 3 pm. La forma automática no funciona si el paro de emergencia de las bombas de agua de servicio esta activo o si las bombas de agua de servicio se encuentran en modo manual.

Control del nivel del Tanque Hidroneumático (TH)

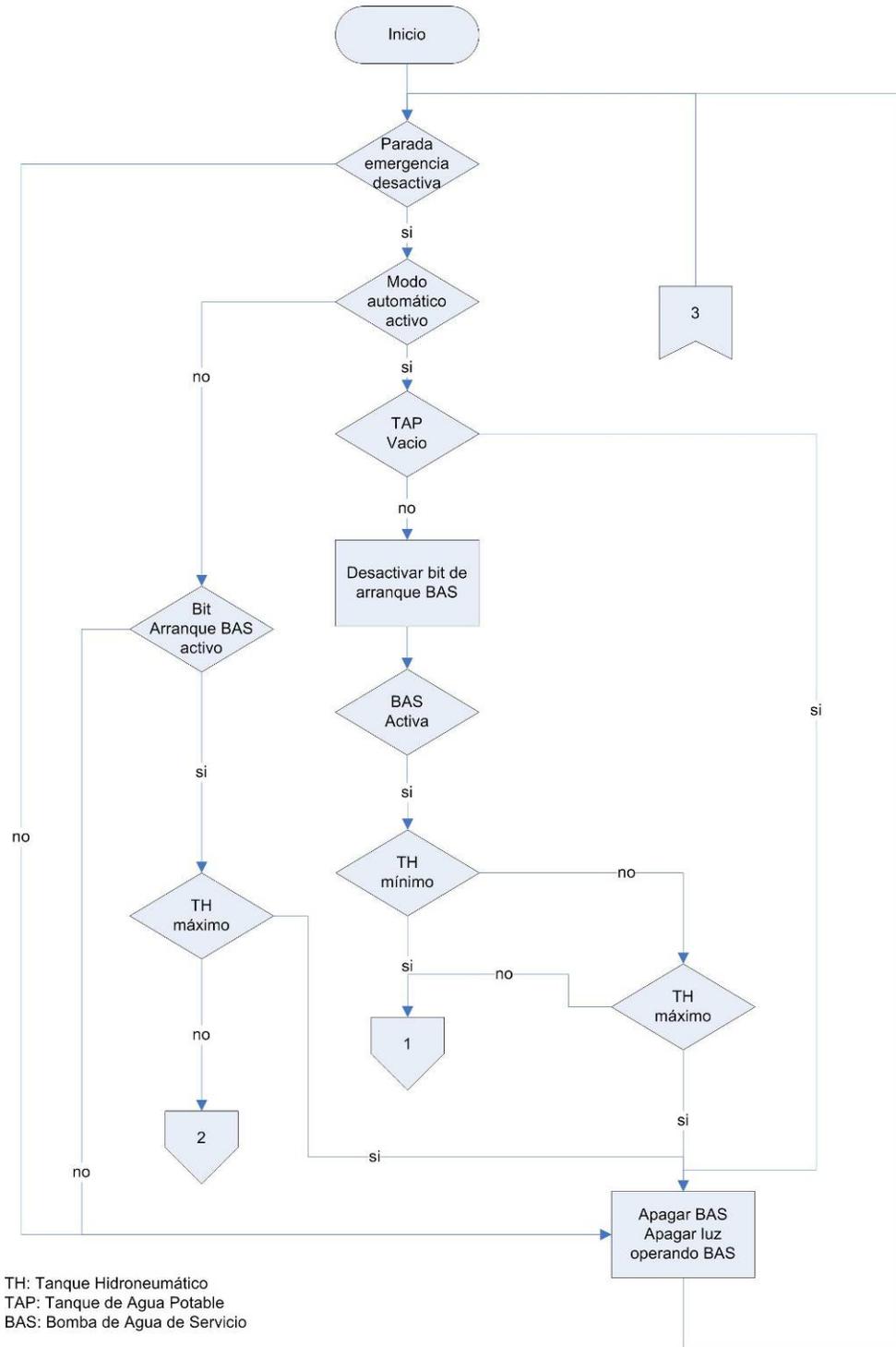


Figura 5.34 Diagrama de flujo para el control de nivel del tanque hidroneumático

Continuación de la figura anterior...

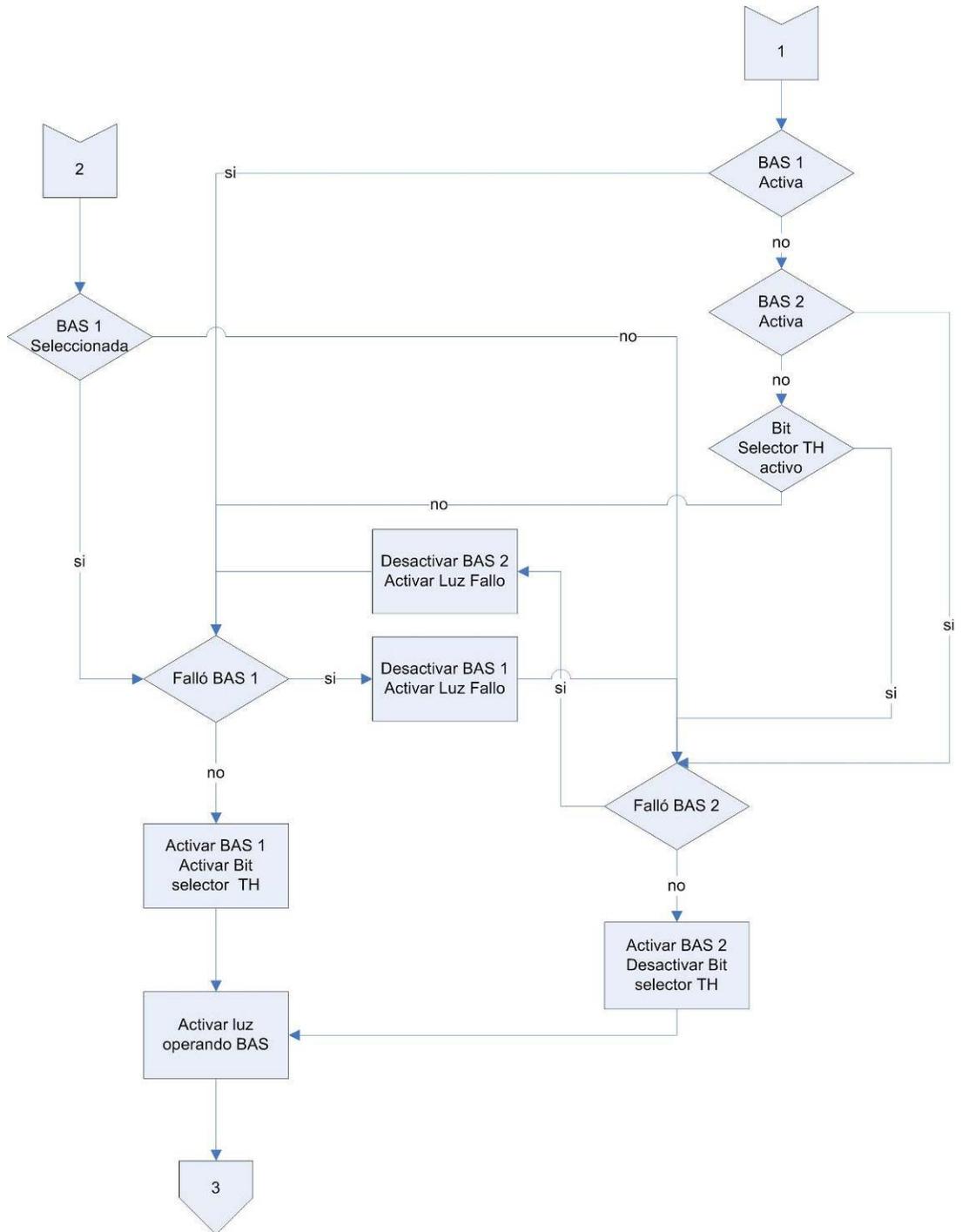


Figura 5.35 Diagrama de flujo para el control de nivel del tanque hidroneumático (continuación)

5.5 Descripción de software en Comunicación y Monitoreo

El diagrama general del sistema de comunicación se muestra en la Figura 5.36, el cual se puede dividir en dos segmentos. Primero, comunicación PLC-RSLinx utilizando el protocolo DH-485 que es una marca registrada de productos Allen Bradley. Segundo, comunicación RSLinx In Touch, por medio del protocolo de comunicación DDE o intercambio dinámico de datos. El RSLinx como mediador, proporciona un registro de acceso al programa In Touch, el cual direcciona los datos bajo un protocolo de tópicos accediendo la dirección de cada variable del PLC bajo el mismo formato de identificación.

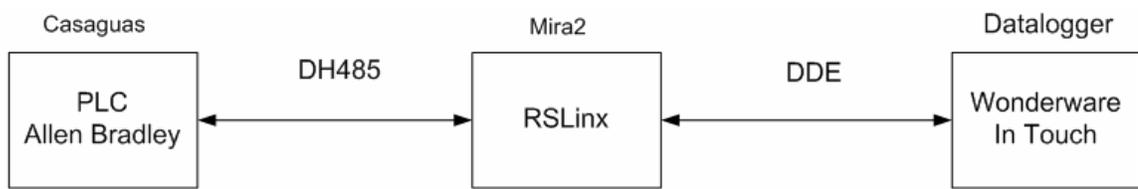


Figura 5.36 Protocolos de transmisión en el sistema de comunicación

Únicamente los datos que son utilizados en el programa In Touch son almacenados en un registro de acceso en el programa RSLinx, evitando el trasiego de información innecesaria que perjudicaría la velocidad de transmisión.

El sistema de monitoreo consiste en una pantalla mímico desarrollada en la herramienta In Touch de Wondeware, la cual se encuentra instalada en el servidor Datalogger en el Centro de Control del Centro de Generación Miravalles. La pantalla principal se muestra en la Figura 5.37.

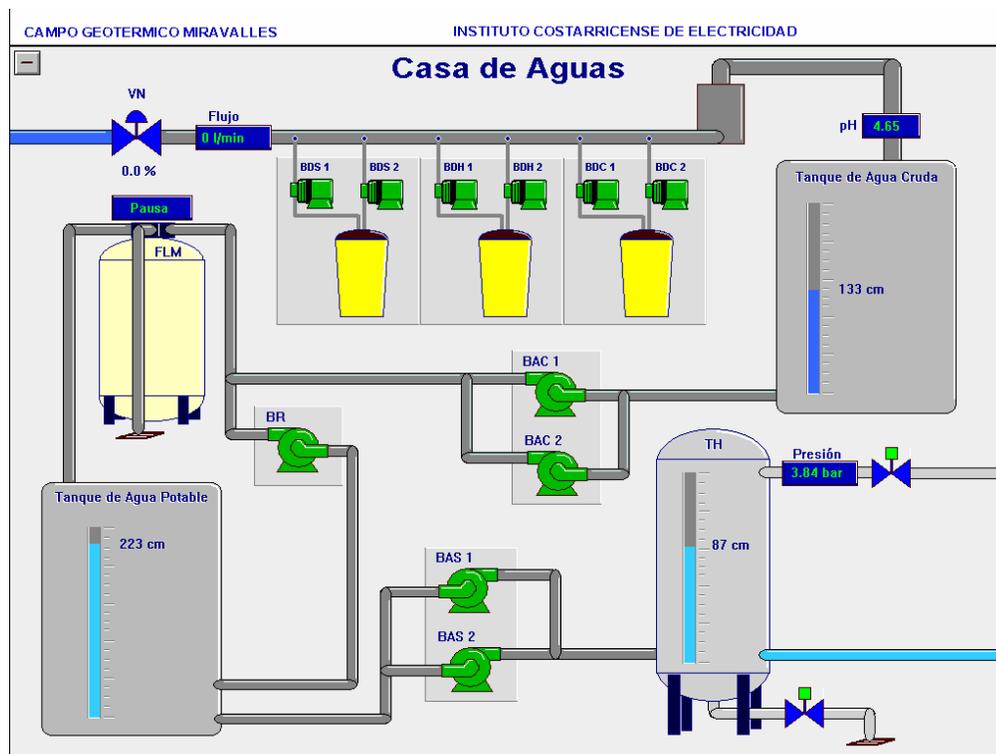


Figura 5.37 Pantalla del sistema de potabilización

En la pantalla principal del sistema de potabilización se muestran en su totalidad los elementos que lo conforman y que son controlados por el PLC. El sistema comienza su recorrido en la parte superior izquierda con la válvula neumática la cual da inicio al proceso de dosificación y de allí el proceso transcurre pasando por cada una de las etapas de proceso. El mímico es un reflejo de lo que ocurre en el sistema en tiempo real. Todas las señales provienen directamente del PLC.

5.5.1 Simbología

La simbología básica que presenta el sistema de potabilización en la pantalla mímico principal se puede observar en el manual de operación, más específicamente en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

5.5.2 Ventanas Auxiliares

Estas despliegan información adicional como el modo de operación manual o automático, selectores de bomba, señales 4-20, volumen efectivo de los tanques, y paradas de emergencia. Para acceder a estas ventanas basta con posicionarse encima de algún elemento y dar un clic al *Mouse*. Ver más detalles en el manual de operación, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

5.5.3 Alarmas

La pantalla de alarmas es de tipo historial y despliega la información necesaria para la detección de un fallo como lo es:

- Día, mes, hora: estos se despliega justo en el momento que es detectado el problema por el programa In Touch
- Evento: existe 4 tipos de eventos EVT, ALM, RTN y ACK. **EVT** se despliega en color amarillo, y se confiere a alguna actividad que se esta realizando, a modo de información. **ALM**, son de color rojo, se refiere a alguna alarma que hay que ponerle atención. **RTN**, son de color azul, y se refiere a alarmas que fueron reestablecidas. **ACK**, son de color verde, se producen cuando se presionan el botón *RECONOCER*, siempre y cuando exista alguna alarma activa en ese momento.
- Comentario: Presenta una descripción del tipo de alarma o evento
- Nombre: despliega el *Tagname*, o nombre con el que es conocido la alarma o evento, en el diccionario de variables del programa In Touch
- Nombre de grupo: se refiere al nombre del grupo al que están asociadas las alarmas. En el caso de del sistema de potabilización, el nombre de grupo es: **CDA**.

Cuando no se encuentra activa ninguna alarma se despliega el siguiente mensaje en la parte central de la pantalla: *HASTA AHORA, NO SE HA PRESENTADO ALARMA NINGUNA EN ESTE GRUPO.*

Un ejemplo más detallado se puede ver en la Figura 5.38, la cual presenta un grupo de alarmas y eventos tomados durante el proceso de prueba. En este caso se produjo un larga lista de eventos y alarmas, sin embargo al final todas las alarmas fueron reestablecidas por lo que aparece el rotulo que indica que ninguna alarma se encuentra activa.

CAMPO GEOTERMICO MIRAVALLES		INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD	
Reconocer		Sistema de Aguas	
DD/MM	HH:MM:SS.MSC	EVT Comment	Name GroupName
24/02	07:49:00.131	ACK Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	07:53:04.903	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	07:53:04.903	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	08:17:07.918	ALM Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	08:17:07.918	ALM Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	08:19:28.920	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	08:19:28.920	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	10:06:26.108	EVT válvula neumatica cerrada	CDA_IND CDA
24/02	10:06:29.993	EVT válvula neumatica cerrada	CDA_IND CDA
24/02	11:21:25.237	ALM Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	11:21:27.180	ALM Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	11:27:51.182	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	11:27:51.182	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	13:29:17.720	ALM alta concentración de carbonato de sodio	CDA_IND CDA
24/02	13:29:26.582	EVT válvula neumatica abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	13:30:18.617	EVT válvula neumatica abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	13:42:40.684	ALM alta concentración de carbonato de sodio	CDA_ALT CDA
24/02	13:45:24.600	RTN alta concentración de carbonato de sodio	CDA_ALT CDA
24/02	14:36:11.701	ALM baja concentración de carbonato de sodio	CDA_BAJ CDA
24/02	14:38:19.185	RTN baja concentración de carbonato de sodio	CDA_BAJ CDA
24/02	14:57:00.637	RTN Baja presion en tanque hidroneumatico	CDA_IND CDA
24/02	14:57:07.708	EVT válvula neumatica abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	14:58:43.605	EVT válvula neumatica cerrada	CDA_IND CDA
24/02	15:15:52.715	ALM Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	15:42:49.730	RTN Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	15:43:24.871	ALM Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	16:02:32.912	ACK Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
25/02	04:53:48.783	RTN Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA

Figura 5.38 Alarmas y eventos durante el proceso de prueba

CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Automatización y Control

El procedimiento empezó por corroborar el correcto funcionamiento de las bombas de agua cruda, retrolavado y servicio; luego se paso a revisar el comportamiento de las diferentes etapas del filtro, el cual desarrolló cada una de sus etapas tal y como fue diseñado, según verificaciones realizadas por los mismos operarios y observaciones hechas en el sentido de flujo del agua. La incorporación de las nuevas válvulas vino a simplificar el sistema (ver Figura 6.1)



Figura 6.1 Nuevo sistema de válvulas para el control del filtro de lecho múltiple

La nueva sección del sistema de dosificación en línea que se muestra en la Figura 6.2, sustituyó la vieja versión en la que se tenían continuas obstrucciones por las largas distancias que debían recorrer los químicos. Ahora la ubicación del nuevo sistema permite verificar con mayor facilidad cualquier problema mecánico o de obstrucción que pueda presentarse.



Figura 6.2 Sistema de dosificación en línea

En la Figura 6.3 se muestra la ubicación del panel local junto con los medidores de flujo y pH.

El nuevo edificio construido para el albergar las secciones de filtrado y distribución se muestran en la Figura 6.4.



Figura 6.3 Panel Loca junto a los medidores de flujo y pH



Figura 6.4 Ubicación de la sección de filtrado y distribución

El panel principal almacena al PLC y la mayor cantidad de dispositivos de interconexión. A este panel llegan todas las señales discretas y analógicas que conforman el sistema de potabilización (ver Figura 6.5).



Figura 6.5 Panel Principal y alambrado interno

La obtención de la Figura 6.7 y Figura 6.8 se realizó con la utilización de un osciloscopio digital de la marca Fluye serie 190. El circuito de medición empleado se muestra en la Figura 6.6, donde se realiza una medición indirecta de la corriente que pasa por la línea. Se utilizan como resistencia de prueba los fusibles F40 y F35 que tienen resistencias definidas de 276.9 y 259.3 Ω respectivamente. En vista que la variación es de 4 a 20mA, el osciloscopio registra un voltaje entre el rango de 1 a 5 V aproximadamente, luego estos registros son modificados tomando en cuenta que una variación de pH de 0 a 14, equivale a 4 a 20mA; y que una variación de velocidad del 0 al 100 % equivale a de 4 a 20 mA.

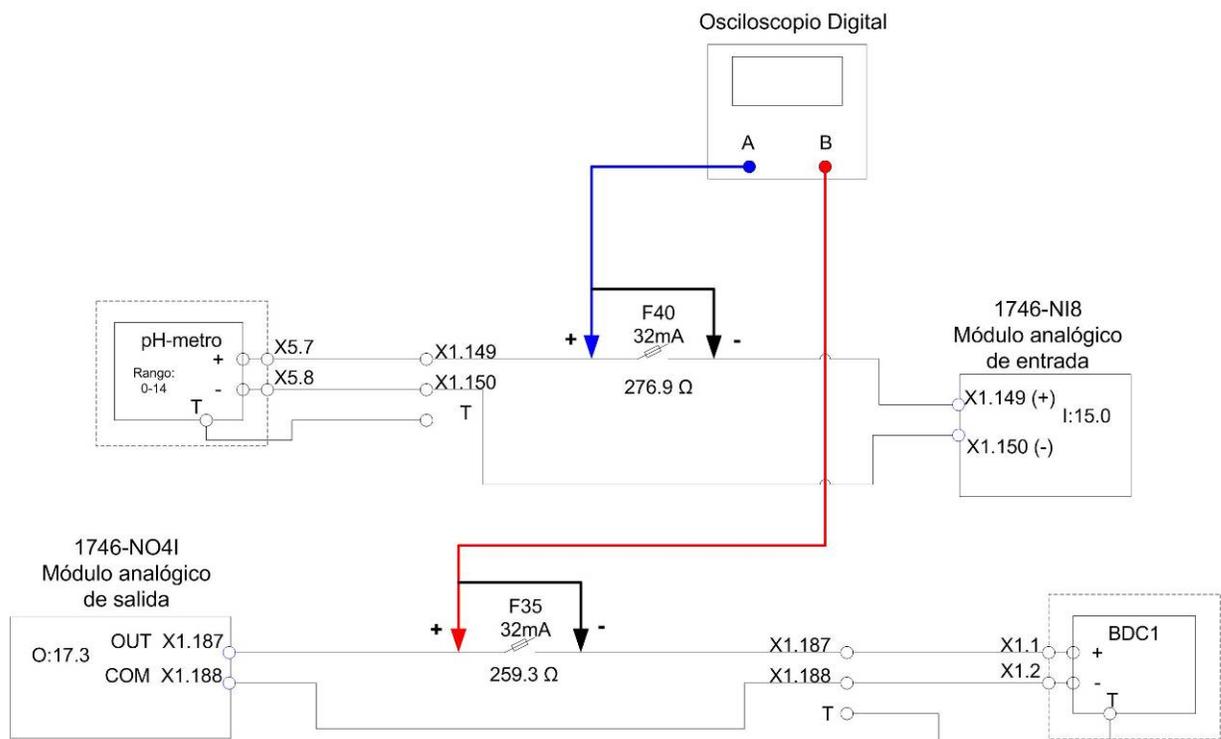


Figura 6.6 Circuito de medición para la obtención del valor del pH en la línea de entrada y velocidad de bombeo en la bomba de dosificación de carbonato de sodio

En la Figura 6.7 se muestra una respuesta de pH ante un escalón de velocidad, forzada en la bomba de dosificación de carbonato de sodio. En esta respuesta se registra un tiempo muerto de aproximadamente 14 s. Este resultado provocó que la respuesta del sistema, fuera lenta y tendiera a la oscilación, en contra posición con lo obtenido en el modelado matemático (en donde el modelo no consideraba el tiempo muerto). Esta oscilación disminuyó considerablemente al disminuir el término proporcional, sin embargo, la respuesta del sistema ante un cambio brusco de pH se hacía más lenta, paso de un tiempo de asentamiento de 8 min a 15 min aproximadamente. Como se menciona en “Control de procesos con dinámica difícil”, “en presencia de retardos la ganancia del controlador debe reducirse para obtener estabilidad a lazo cerrado. Esto traerá como consecuencia que el sistema responda más lentamente. Es decir, sacrificamos desempeño en aras de lograr estabilidad. Entre más grande sea el retardo mayor será también la reducción de la ganancia del

controlador” (12, Flores). En vista de esta conclusión se redujo un poco la ganancia proporcional sin perjudicar en gran medida el tiempo de asentamiento.

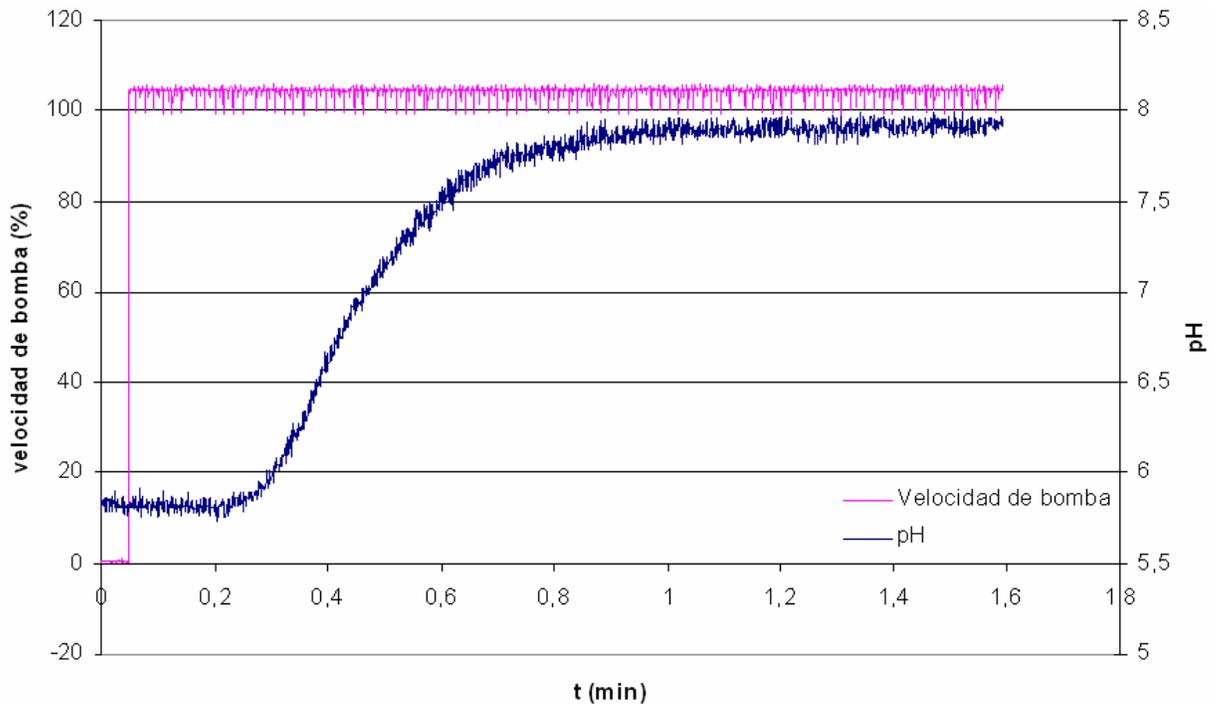


Figura 6.7 Respuesta del pH ante un escalón de velocidad de la bomba de dosificación de carbonato de sodio

Como se muestra en la Figura 6.8 recopilada justo 6 minutos después de iniciado el proceso de dosificación en condiciones normales⁶, se muestra como hay una tendencia de oscilación (periodo de 20 minutos) en el régimen permanente debido al tiempo muerto, además se observa como el pH tiene una clara tendencia a un valor de 6.7 (según el promedio de los 2704 datos de pH de la Figura 6.8). Lo cual significa una desviación de pH de 0.3 en comparación con el punto de ajuste (pH 7), lo que demuestra que se obtuvo un error de estado estacionario de un 0.4%, muy por debajo del 3% propuesto)

⁶ Condición de pH cercano a 7 justo antes de iniciado el proceso de dosificación

Los valores de la Tabla 6.1 se obtuvieron por medio de observaciones realizadas en el medidor de pH. Para cada repetición se tomo el tiempo de establecimiento y el sobre-impulso presentado a partir de un pH inicial de 4.5 aproximadamente. El tiempo de establecimiento se estableció, cronometrando el tiempo que tardaba el pH en ingresar dentro del rango de 6.9 a 7.1.

El tiempo de asentamiento obtenido fue de 12 minutos (bajo condiciones extremas⁷, ver Tabla 6.1) cercanos a los 10 minutos que se habían propuesto, esta condición se consideró satisfactoria debido a que apenas implicaba un 3.3% del tiempo total (considerando un llenado del tanque de agua cruda de 6 horas).

Tabla 6.1 Tiempos de establecimiento y sobre-impulso medidos a partir de un pH de 4.5

Repetición	Tiempo de establecimiento (s)	Sobre-impulso (pH)
1	15	8.4
2	10	7.9
3	12	8.2
4	11	8.2
Promedio	12	8.17

El sobre impulso obtenido fue de un 16.7% (pH de 8.17, ver Tabla 6.1), sin embargo, se consideró apropiado dejarlo en este valor debido a que una reducción del mismo implicaba desajustar los parámetros ya establecidos, los cuales eran de mayor importancia en el proceso.

⁷ Tiempo de establecimiento a partir de condiciones extremas de recuperación , a partir de un pH de 4.5, cual es el pH mínimo producido por el sulfato de aluminio sin la presencia del carbonato de sodio

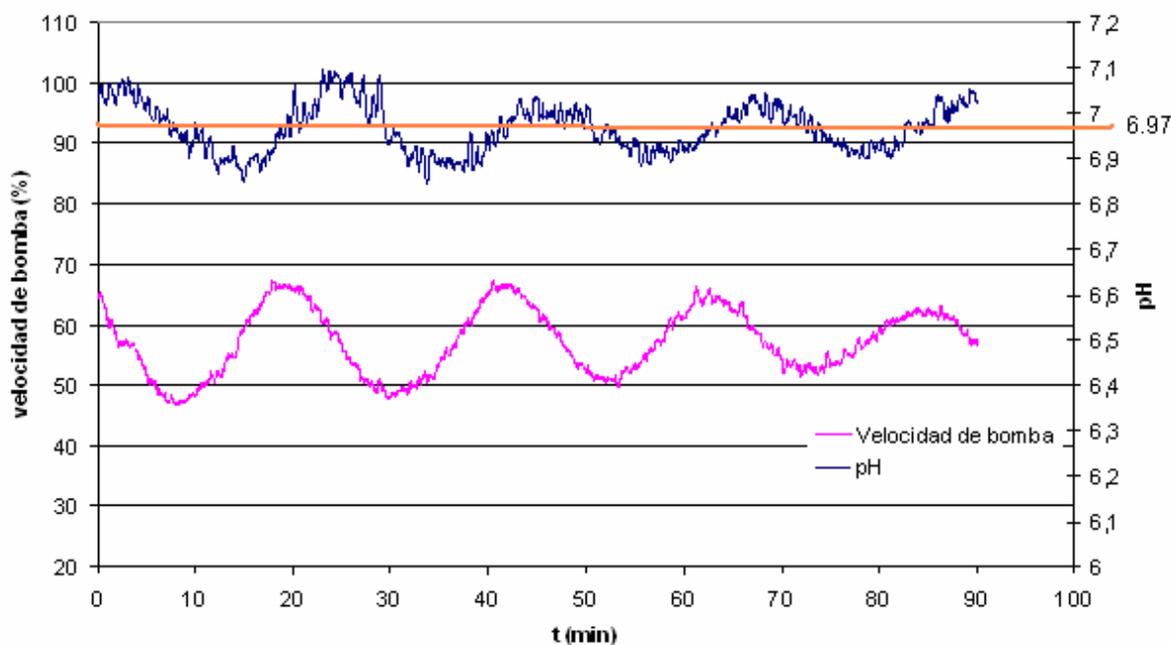


Figura 6.8 Velocidad de la bomba y valor de pH obtenidos después de 6 minutos de iniciado el proceso de dosificación

El resultado más importante del sistema de potabilización se muestra en la Tabla 6.2. Para la toma de estos datos se ajustaron las bombas de dosificación después de varias pruebas anteriores, se vació totalmente el tanque de agua cruda, y se dejó que el sistema iniciara el proceso por su cuenta. Una vez pasado el proceso de dosificación y llenado del tanque de agua cruda (duración aproximada de 12 horas), el sistema activo las bombas de agua cruda para pasar el agua por el filtro y de allí al tanque de agua potable, de donde se extrajo la muestra 7722. Luego se vació nuevamente el tanque de agua cruda y se realizó el proceso de la misma manera para tomar las muestras 7736, 7750 y 7763.

Como se observa en la **Tabla 6.2**, todos los registros presentan un pH y conductividad dentro de los rangos adecuados⁸, las variaciones se muestran para la turbiedad y la concentración de cloro.

⁸ Las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 6,5 y 8

El primer registro presento una alta concentración de cloro residual con 1.920 ppm muy por encima del rango deseado de 0.5 ppm, según lo establecido por el área de química del CGM; también presento una alta turbiedad de donde lo ideal debería ser menor que 1 NTU⁹ (Unidades Nefelométricas de Turbidez). A partir de estos resultados se hicieron pequeñas correcciones agregando más cantidad de sulfato de aluminio para disminuir la turbiedad y menor de hipoclorito de calcio para la concentración de cloro gaseoso. Estas modificaciones se hicieron utilizando las perillas de Stroke lenght (largo del impulso), las cuales estaban previstas dentro del diseño para este propósito.

Los resultados posteriores como se muestran en la tabla adquieren una gran mejoría de donde los últimos dos registros 7750 y 7763 se consideran potables. Demostrando y dando por hecho la factibilidad del sistema.

Tabla 6.2 Parámetros de potabilidad realizadas en el tanque de agua potable durante el mes de febrero del 2005

Día	# Registro	pH	conduc.(uS/cm)	Turb.(NTU)	Cl ₂ ppm
17	7722	6,95	140,8	1,12	1,920
18	7736	7,01	130,8	0,41	0,710
21	7750	7,05	138	0,44	0,570
22	7763	7,02	134,20	0,39	0,590

⁹ Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU.

6.2 Comunicación y Monitoreo

Los resultados obtenidos para la verificación del correcto funcionamiento del sistema de comunicación fueron tomados del programa RSLinx, el cual dentro de las herramientas de diagnostico posee un registro en donde almacena información sobre la transmisión y recepción de datos.

Los datos obtenidos en la Tabla 6.3 fueron adquiridos durante cuatro días consecutivos bajo las mismas condiciones. Se demuestra que el porcentaje de paquetes de datos no llega al 1% de error, dando por satisfecho la comunicación entre el PLC y el servidor Mira2.

Tabla 6.3 Porcentaje de error de paquetes de datos recibidos en el mes de febrero del 2005

Día	Hora	Paquete recibidos	Paquetes recibidos con errores	Error (%)
21	16:30	6356264	30326	0.48
22	16:31	3984651	12385	0.31
23	16:25	4023602	23656	0.59
24	16:29	3702365	15364	0.41

El comportamiento del sistema de monitoreo, se verificó, forzando el funcionamiento del sistema de potabilización. Se indujeron diferentes tipos de fallas controladas para verificar su respectivo despliegue en la ventana de alarmas. Se observó, la variación de los niveles en los tanques, así como el comportamiento del sistema de dosificación, junto con las diferentes animaciones y su concordancia con lo que ocurría en tiempo real.

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones.

- El sistema de electro-válvulas que vinieron a sustituir el “Timer” mecánico del filtro de lecho múltiple, eliminaron al 100% las posibilidades de fallo que el viejo sistema tenía, con la sustitución de un sistema menos complejo y fácil de reparar.
- Los nuevos sensores analógicos de presión y nivel, incorporados al tanque hidroneumático, permitieron que esta parte del proceso se incorporara de forma más dinámica dentro del sistema de monitoreo.
- El control de la bomba de dosificación de carbonato de sodio a lazo cerrado mantiene un nivel de pH 6.7 en el régimen permanente, es decir, 0.4% de error de estado estacionario.
- El sobre-impulso y el tiempo de establecimiento obtenidos, tuvieron un pH de 8.17 y 12 s respectivamente.
- El control de las bombas de dosificación a lazo abierto de sulfato de aluminio, permitió una regulación de partículas suspendidas o turbiedad hasta un nivel de 0.39 NTU, un 60% por debajo del valor sugerido para el agua potable (1 NTU).
- El control a lazo abierto para la bomba de dosificación de hipoclorito de calcio, permitió obtener una concentración de cloro residual de 0.59 ppm.
- La consideración en el diseño de la regulación de la dosificación por medio de la perilla “Stroke length” (largo del impulso), permitió hacer pequeñas modificaciones en la cantidad de dosificación de químicos, sin alterar la programación del sistema.
- Se desarrolló un programa en lenguaje escalera capaz de automatizar todo el proceso de potabilización del agua, con un total de 113 señales digitales y 19 analógicas.

- El PLC como sistema centralizado permite múltiples ventajas en cuanto al manejo inteligente de variables mediante software, sin embargo, esta ventaja se convierte en desventaja si ocurre un error fatal en el procesador del PLC, ya que neutralizaría el funcionamiento total del sistema.
- Se implementó un sistema de comunicación que cumple a cabalidad con lo desarrollado en el proyecto, con un porcentaje de error menor de 1% para paquetes de datos recibidos.
- El desarrollo de la pantalla mímico en el programa In Touch de Wonderware permitió ser una excelente herramienta para la detección temprana de fallos, gracias a su sistema descriptivo que focaliza la falla en el momento que se presenta.

7.2 Recomendaciones

Uno de los principales problemas presentados en el sistema de dosificación ocurrió con la conexión de las bombas de dosificación, en la línea de entrada de agua cruda, ya que al parecer se está produciendo presiones que llegan a valores cercanos a la presión límite de bombeo (especialmente con las bombas de la marca Pulsatron cuya presión máxima ronda los 7 bar) cuando el flujo de entrada de agua cruda llegaba a los 1500 l/min. Podría estudiarse la posibilidad de eliminar el mezclador ciclónico (siempre y cuando no afecte el desempeño de la lectura de pH) ya que éste frena la velocidad del agua elevando la presión en la línea de entrada, y produciendo un esfuerzo mayor en el bombeo, lo cual podría perjudicar a largo plazo la vida útil de la bomba.

Corrigiendo el problema anterior, consideraría la posibilidad de reducir el llenado del tanque de agua cruda ya que está diseñado para trabajar a un flujo de 1500 litros por minuto.

Bibliografía

1. Allen Bradley Company Inc. Juego de instrucciones de SLC 500 y MicroLogix 1000: Manual de referencia. [En Línea]. No 1747615es. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004]
2. _____. AIC+ Advanced Interface Converter: 1761-NET-AIC User manual. [En Línea]. No 176164. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
3. _____. Digital I/O Modules: Instalation Manual. [En Línea] No 1746-in027a-en-p. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
4. _____. Hardware estilo modular SLC500: Manual de instalación y operación. [En Línea]. No 174762es. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
5. _____. Procesadores modulares SLC 500: Información sobre productos. [En Línea]. No 1747239es. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
6. _____. Módulos de E/S analógicos: Manual de usuario para 1746-NO4I. [En Línea]. No 1746-um005_-es-p. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
7. _____. SLC Analog input module: 1746-NI8 User manual. [En Línea]. No 1746-um020a-en-p. <www.rockwellautomation.com>. [Consulta: ago 2004].
8. ABB Inc. Advantage Series type TB84PH/ORP: Analyzer instruction manual. No I-E67-84-1B. S.I: ABB, Feb 2002.

9. Centro de Generación Miravalles. Organización ICE: Proyectos especiales. 2004.
10. CEPIS. Guías OMS para la calidad del agua de bebida. Ver 7/9/2005. [en Línea]. < <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/caliagua/guiasoms.html> >. [Consulta: jul 2005].
11. Culligan International Company. Hi-Flo 55 Water Filters: Installation and operating instructions. USA: Culligan,1992.
12. Flores, Antonio. Control de procesos con dinámica difícil. Departamento de Ciencia, Universidad Iberoamericana. México, oct 2002. [En Línea.] <<http://200.13.98.241/~antonio/cursos/control/notas/isis/cpddif.pdf>>. [Consulta: jun 2005].
13. Goodwin, G.; Graebe, S.; Salgado, M. Control PID Clásico. Control System Design, The University of Newcastle. [En Línea.] <http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C07.pdf>. [Consulta: ene 2005].
14. Hanna Instruments. Desinfección del agua potable, modos de control y manipulación del hipoclorito. [En Línea.] <<http://www.hannachile.com/consejos/8/desinfeccion-agua-potable-control-manupulacion-hipoclorito.htm> >. [Consulta: jul 2005].
15. IPS Inc. Forum MrPLC. Ejemplos de programación para PLC Allen Bradley. Ver 1.2. 2003. [en Línea]. <<http://forum.mrplc.com/index.php?act=Downloads&CODE=01&cat=2>>. [Consulta: set 2004].

16. Lenntech. Estándares Europeos de la calidad del agua potable. [En Línea.]
<<http://www.lenntech.com/espanol/est%C3%A1ndares-de-calidad-del-agua.htm>> [Consulta: mar 2005].
17. Magnetrol International. Kotron Model 805 Smart RF: Level transmitter, installation and operation manual. No 50-660. USA: Magnetrol, 2004.
18. Milton Roy. Electronic metering pumps: Installation maintenance troubleshooting. [En Línea]. <www.miltonroy.com>. [Consulta: ago 2004].
19. PLC Guide. PLC Command Instruction, based on Allen Bradley SLC 500 and RSLogix 500 software. [en Línea]. [USA], 2003. <<http://plcguide.mrplc.com/index.html>>. [Consulta: set 2004].
20. Pulsatron. Electronic metering pumps: Series E installation, operation and maintenance instruction. [En Línea]. <www.pulsatron.com>. [Consulta: ago 2004].
21. Rockwell Software Inc. RSLogix 500: User manual. USA: Rockwell, jul 2000.
22. Signet Scientific Company. 8900 Multi-Parameter controller: Installation and operation manual. No 3-8900.090-1. USA: GF Signet, 2003.
23. Tratagua S.A. Purificación y tratamiento de aguas: Manual de procedimiento, planta de tratamiento de agua para remover hierro. 1994.

24. UNP. Universidad Nacional de la Plata. Departamento de electrónica. Compensación Clásica de Sistema Muestreados. [En Línea]. <<http://davinci.ing.unlp.edu.ar/controlm/archivos/electricista/doc/apunte01/cap5.pdf>>. [Consulta: jul 2005].
25. USP. Universidad de San Pablo. Guía Kit para el analisis de agua. [En Línea]. <<http://educar.sc.usp.br/biologia/textos/kitspan.html>>. [Consulta: mar 2005].
26. Varela, Laura; Arias, Mauro. Historia Centro de Generación Miravalles. Bagaces, Fortuna: s.n, nov 2002.
27. Wonderware Corporation. In Touch 7.0 Basic: Training manual, revision B, part number: 05-3004. S.I: Wonderware, ago 1998.
28. Yokogawa Corporation of America. Absolute Pressure and Gauge Pressure Transmitter: Model EJA3X0A instruction manual. 3 ed. S.I: Yokogawa, jul 1998.

APÉNDICES Y ANEXOS

APÉNDICE A

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Tabla A 1 Glosario

Elemento	Función
Tanque de agua cruda (TAC)	Eliminar el color, las bacterias, los sedimentos gruesos y el hierro soluble para el proceso de filtrado.
Tanque de agua potable (TAP)	Contener el agua potable.
Filtro de lecho múltiple (FLM)	Eliminar los sólidos suspendidos más finos.
Tanque hidroneumático (TH)	Dar presión al agua para servicio.
Bombas de agua cruda (BAC)	Enviar ésta al filtro y al tanque de agua potable.
Bombas de agua de servicio (BAS)	Enviar el agua al tanque de presión.
Bombas de dosificación de: hipoclorito de calcio, carbonato de sodio y sulfato de aluminio	Desinfectar, neutralizar y acondicionar el agua.
Tanques de químicos (3)	Contener los químicos a dosificar.
Panel de control general de equipos eléctricos	Incluye: PLC, Reles, contactores, sistema de protección, fuentes, indicación en Manual y Automático, botoneras, indicadores de estado visuales.
Contador de agua filtrada	Totalizar el agua filtrada
Medidor flujo de agua cruda	Para el control proporcional de las bombas de cloro y sulfato de aluminio, de acuerdo al flujo
Medidor de pH	Controlar la tasa de dosificación de la bomba de carbonato de sodio

Sensores de nivel	Para medir el nivel de los tanques de agua cruda y de servicio
Válvula Neumática (VN)	Controla la apertura del agua en el tanque de agua cruda
RSLogix	Software para el desarrollo del programa escalera del PLC
RSLinx	Software de comunicación entre el PLC y PC
DDE	Dynamic Data Exchange (Intercambio dinámico de datos)

A.2 Manuales de usuario

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD

Centro de Generación Miravalles



**Manual de Operación
Sistema de potabilización y suministro de agua**

Andrés Sancho Salazar

**22-2-2005
Fortuna, Bagaces**

INDICE

CAPITULO 1: Introducción.....	139
CAPITULO 2: Sistema de Control.....	143
2.1 Nivel tanque de agua cruda.....	143
2.2 Nivel tanque de agua potable.....	145
2.3 Tanque hidroneumático.....	146
2.3.1 Nivel.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.2 Presión.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3 Drenaje.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4 Alarmas.....	148
2.4 Sistema de dosificación.....	149
2.4.1 Agitadores.....	150
2.4.2 Alarmas.....	150
2.5 Filtro de lecho múltiple.....	151
2.6 Operación normal.....	152
CAPITULO 3: Fallas.....	153
3.1 Bombas de agua cruda.....	153
3.2 Bombas de agua de servicio.....	153
3.3 Bombas de dosificación.....	154
3.3.1 Luz falla dosificación hipoclorito de calcio.....	155
3.3.2 Luz falla dosificación sulfato de aluminio.....	155
3.3.3 Luz falla dosificación carbonato de sodio.....	155
3.4 Fallo filtro de lecho múltiple.....	156
3.5 Fallo válvula neumática.....	156
CAPITULO 4: Sistema de Monitoreo.....	158
4.1 Simbología.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2 Ventanas Auxiliares.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.1 Válvula neumática.....	163

4.2.2	Flujímetro y pH-metro	164
4.2.3	Tanques de agua cruda y potable	164
4.2.4	Bombas de dosificación	165
4.2.5	Bombas de agua cruda, servicio y retrolavado	166
4.2.6	Tanque hidroneumático	167
4.3	Alarmas	¡Error! Marcador no definido.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

El presente manual pretende mostrar las características básicas de operación del sistema de potabilización y las propiedades de monitoreo en el programa In Touch. El sistema de control esta orientado en cinco módulos principales que trabajan de manera complementaria, como se muestra en la Figura 1.1.

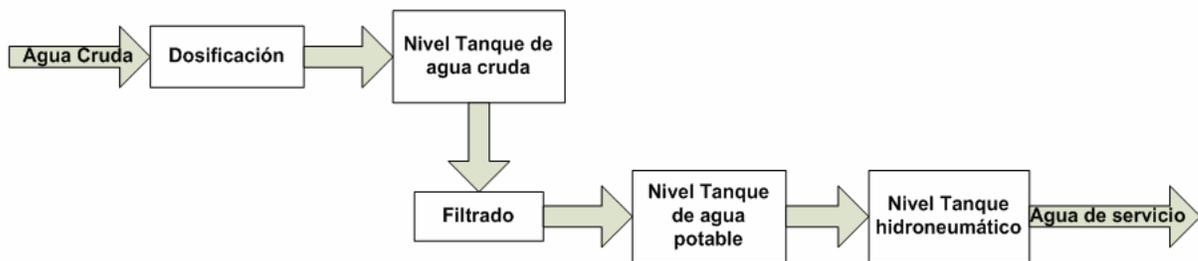


Figura 1.1 Módulos principales del sistema de control

En este manual se realizan las descripciones tomando en cuenta estos módulos de control, ya que el sistema esta programado en base a ellos.

Cada módulo depende de diferentes elementos para su correcta operación, como se muestra en la **Tabla 1.1**.

Dentro del manual se enfatizará aspectos de control desde un punto de vista descriptivo para facilitar su comprensión. Las descripciones están enfocadas tomando en cuenta el Panel de Control Principal (ver Figura 1.2) y el Panel de Control Local (ver Figura 1.3), ya que la manipulación del sistema, por parte del operador, depende exclusivamente de estos dos paneles.

Tabla 1.1 Principales elementos que conforman los módulos de control

Módulo	Elementos
Dosificación	Bombas de dosificación Indicadores de nivel de los tanques dosificadores Agitadores Medidor de flujo Medidor de pH
Nivel Tanque de Agua Cruda	Válvula neumática
Filtrado	Bomba de retrolavado Válvulas solenoides
Nivel tanque de agua potable	Bombas de agua cruda
Nivel tanque hidroneumático	Bombas de agua de servicio Indicador de presión Indicador de Nivel Válvula solenoide de drenaje



Figura 1.2 Panel de control principal del proceso de potabilización

Panel Local Casa de Aguas



Figura 1.3 Panel de control local

CAPITULO 2: SISTEMA DE CONTROL

2.1 Nivel tanque de agua cruda

El tanque de agua cruda (TAC) almacena el agua cruda dosificada, el cual debe pasar por un proceso cíclico de renovación. Debido a que este proceso depende de la acción de los químicos, se requiere que el agua dosificada sea consumida en su totalidad antes de volver a empezar un nuevo ciclo.

El nivel del TAC depende del consumo o demanda de agua que requiera el tanque de agua potable (TAP). La válvula neumática (VN) la cual permite el control del nivel del TAC, posee dos modos de operación *Manual* y *Automática* estos se escogen en selector colocado en el panel local.

En el modo manual la válvula se abre o se cierra únicamente presionando el botón *Abrir/Cerrar* que se encuentra justo debajo del selector. Hay que tomar en cuenta que en este modo el control queda exclusivamente a criterio del operador. Por lo que puede ocurrir que el sistema no inicie el proceso de llenado o se sobrepase el límite superior hasta llegar a desbordamiento.

En el modo automático la apertura y cierre de la válvula depende de las condiciones que el sistema tenga en ese momento las cuales se describen a continuación.

La válvula neumática se abre dependiendo de dos condiciones:

- Cuando el transmisor de nivel indica vacío (<60cm)
- Cuando el volumen del TAC no es suficiente para volver a llenar la siguiente solicitud del tanque de agua potable en el momento que este se encuentra en su punto máximo. En otras palabras, si el volumen es menor que 80 m³ cuando el TAP se encuentra en su nivel máximo.
- No se abrirá si se tiene alguna de las condiciones de cierre

La válvula neumática se cierra según las siguientes condiciones:

- Cuando el transmisor de nivel indica máximo (>237cm)
- Bajo nivel en alguno de los tanque dosificadores
- Cuando el pH sea menor que 6.6 o mayor que 7.4 durante mas de 10 minutos
- Cuando se produce un fallo por circuito abierto o fallo de sub o sobre rango en las señales 4-20 de los siguientes instrumentos: pH-metro, flujímetro y retorno de válvula neumática
- Cuando se queman los protectores de sobre corriente de alimentación, en las dos bombas de un mismo químico dosificador
- Paro de emergencia activo

El panel local posee un indicador de porcentaje de apertura que depende directamente de la señal de realimentación proveniente de la válvula neumática. La válvula tarda 1 minuto abriéndose en su totalidad al igual que para cerrarse. No se puede cerrar la válvula cuando este se encuentra en el minuto de apertura excepto con el paro de emergencia el cual envía una señal de cierre repentino. Lo mismo sucede en el caso contrario, cuando se esta cerrando la válvula esta no se puede abrir, hasta que no se encuentre cerrada, esto como medida de seguridad.

Alarmas

El nivel TAC tiene dos alarmas, las cuales son indicadas en el panel principal:

- Nivel alto TAC: cuando el nivel esta por encima de lo normal. Esta se activa cuando el nivel de agua es superior a 241 cm.
- Nivel bajo TAC: cuando el nivel esta por debajo de lo normal. Esta se activa cuando el nivel de agua es inferior a 45 cm.

2.2 Nivel tanque de agua potable

Este nivel es sensado por el transmisor de nivel del TAP, el cual activa o desactiva las bombas de agua cruda dependiendo de las condiciones que se presenten en el sistema. Las bombas de agua cruda poseen dos modos de operación *Manual* o *Automático* los cuales se seleccionan en el selector escogido para este propósito en el panel principal.

En el modo manual se puede arrancar o parar una bomba pulsando el botón *Arranque/Paro*, la bomba escogida depende de cual de las dos bombas disponibles se encuentre seleccionada. En este modo el control de las bombas queda a criterio del operario por lo que se debe tener cuidado de que el nivel del TAC no se encuentre por debajo de lo normal y que las tuberías se encuentren debidamente purgadas. Al igual que en TAC, puede ocurrir que el sistema no inicie el proceso de llenado o se sobrepase el límite superior hasta llegar a desbordamiento.

En modo automático es el sistema quien define cuando arrancar o parar las bombas dependiendo de diferentes condiciones que se definen a continuación.

Condiciones de arranque:

- Cuando el nivel del TAP es mínimo (<184cm)

Condiciones de paro:

- Cuando el nivel del TAP es máximo (>234cm)
- Nivel TAC indica vacío (<60)
- Cuando se produce un fallo en el transmisor de nivel TAP
- Cuando inicia el proceso de retrolavado
- Cuando se produce un fallo en ambas bombas de agua cruda
- Paro de emergencia activo

En modo automático, las bombas de agua cruda se alternan para disminuir el trabajo y aumentar su vida útil. Sin embargo, si el tanque de agua potable se encuentra vacío se recomienda llenarlo de forma manual y alternar manualmente de una bomba

a otra para completar el llenado y así no sobre utilizar una sola bomba para tal propósito.

Alarmas

El nivel TAP tiene dos alarmas, las cuales son indicadas en el panel principal:

- Nivel alto TAP: cuando el nivel esta por encima de lo normal. Esta se activa cuando el nivel de agua es superior a 238 cm.
- Nivel bajo TAP: cuando el nivel esta por debajo de lo normal. Esta se activa cuando el nivel de agua es inferior a 130 cm.

2.3 Tanque hidroneumático

2.3.1 Nivel

Este nivel es indicado por el transmisor de nivel por presión diferencial del tanque hidroneumático (TH) el cual dependiendo de su nivel y de las condiciones del sistema activa o desactiva las bombas de agua de servicio. Estas bombas al igual que las bombas de agua cruda poseen dos modos de operación *Manual* y *Automático* los cuales cambian según el selector ubicado en el panel principal.

En el modo manual, se puede activar o desactivar una de las bombas, según la bomba seleccionada, presionando el botón *Arranque/Paro*. Es importante recordar que en el modo manual, el arranque solo lo puede provocar el operario presionando el botón antes mencionado, sin embargo, por motivos de seguridad en este modo también funciona el punto de parada automático, que corresponde a un nivel máximo (>90cm).

En el modo automático, las condiciones de arranque y pare depende del sistema.

Condiciones de arranque de las bombas de agua de servicio:

- Cuando el nivel TH indica mínimo (<60cm)

Condiciones de pare de las bombas de agua de servicio:

- Cuando nivel TH indica máximo (>90cm)
- Cuando nivel TAP indica vacío (<60cm)

- Por fallo en el transmisor de nivel TH
- Cuando se produce un fallo en ambas bombas de agua de servicio
- Paro de emergencia activo

En modo automático, al igual que las bombas de agua cruda, las bombas de agua de servicio se alternan para disminuir el trabajo y aumentar su vida útil.

2.3.2 Presión

En el tanque hidroneumático existe también un transmisor de presión el cual indica constantemente la presión de aire que se encuentra dentro tanque. En caso de pérdida de presión existe una electro-válvula que permite el ingreso de aire asía el tanque, su activación depende de dos condiciones:

- El nivel de agua TH se superior a 85 cm
- Y que la presión sea menor que 3.5 bar

La electro-válvula se desactiva cuando:

- La presión es mayor que 4 bar
- Nivel TH es menor que 85 cm
- Fallo en el transmisor de presión
- Paro de emergencia de las bombas de agua de servicio

Hay que tomar en cuenta que si el nivel permanece inferior a 85 cm y existe una fuga de aire, la presión seguirá bajando y el tanque no llegara a recargarse de aire. En todo caso esto es una situación anómala ya que no deberían existir fugas.

2.3.3 Drenaje

La válvula de drenaje es encargada de eliminar residuos que se acumulan en fondo del tanque. Esta se activa de forma automática dos veces por día, a las 8 am y a las 3 pm. La forma automática no funciona si el paro de emergencia de las bombas de

agua de servicio esta activo o si las bombas de agua de servicio se encuentran en modo manual.

Tiene una forma de activación manual que depende de las siguientes condiciones:

- Bombas de agua de servicio en modo automático
- Mantener presionado el botón *Arranque/Paro* de las bombas de agua de servicio por más de 3 segundos.

Para desactivarla se puede hacer de dos formas:

- Pasar el selector de bombas de agua de servicio a modo manual
- O presionando el botón *Arranque/Paro* por más de 3 segundos en modo automático

2.3.4 Alarmas

El nivel TH tiene 4 alarmas, las dos primeras son indicadas en el panel principal y las otras en el centro de control:

- Baja presión TH: presión por debajo de lo normal. Esta se activa cuando la presión es inferior a 2.5 bar.
- Bajo nivel TH: nivel por debajo de lo normal. Se activa cuando el nivel es inferior a 20 cm.
- Alta presión TH: presión por encima de lo normal. Se activa cuando la presión es superior a 5 bar.
- Alto nivel TH: Nivel por encima de lo normal. Se activa cuando el nivel es superior a 110 cm.

2.4 Sistema de dosificación

El control del sistema de dosificación se encuentra en su totalidad en el panel de control local. Se dividen en tres controles que funcionan de manera independiente según el químico a dosificar:

- Control bomba de dosificación hipoclorito de calcio
- Control bomba de dosificación sulfato de aluminio
- Control bomba de dosificación carbonato de sodio

Las bombas dosificadoras poseen dos modos de operación *Manual* y *Automático*.

Bajo el modo manual se puede encender y apagar una bomba dosificadora pulsando el botón *Arranque/Paro*, independientemente si hay o no flujo agua en la línea de entrada. Cuando se activa una bomba bajo este modo el PLC pone a funcionar la bomba a su máxima velocidad. Si se desea regular esta velocidad, hay que recurrir al control manual propiamente de la bomba, la cual se encuentra en la parte posterior de la misma, esto deshabilita el control proveniente del PLC, permitiendo regular la velocidad por medio de la perilla diseñada por el fabricante para este propósito.

En modo automático el sistema de dosificación da inicio dependiendo de dos condiciones:

- Válvula neumática abierta más de un 25%
- Y flujo de entrada superior a 300 litros por minuto

El sistema puede parar ya sea por paro de emergencia o por que alguna de las condiciones anteriores no se cumple.

Tanto en modo manual o automático, se puede seleccionar la bomba con la que se requiere trabajar.

Se debe mantener flujo de entrada de aproximadamente 1000 l/min. Este flujo es regulado por la válvula de bola que se encuentra antes de la válvula neumática.

Si se requieren hacer pequeñas modificaciones en la cantidad de químico a dosificar esto se puede realizar directamente en la bomba en la parte posterior girando la

perilla de “*Stroke*”. Esta perilla solo se mueve cuando la bomba esta en funcionamiento.

2.4.1 Agitadores

Existen tres agitadores uno para cada tanque dosificador, estos se encienden y apagan girando el selector *ON/OFF* en la parte inferior del panel local, según el químico que corresponda.

Para los agitadores de carbonato de sodio y sulfato de aluminio, existe un sistema automático de activación, el cual depende de las siguientes condiciones:

- El tanque dosificador no indique vacío
- El selector de modo, del químico respectivo, se encuentre en automático
- Paro de emergencia desactivo

El agitador se activa por 5 min y para 10 min, siempre y cuando se cumplan las condiciones anteriores.

2.4.2 Alarmas

El sistema de dosificación tiene 3 alarmas que son indicadas en la parte superior del panel de control local. Estos indican si alguno de los tanques dosificadores tiene bajo nivel de químico.

2.5 Filtro de lecho múltiple

El control del filtro de lecho múltiple (FLM) se encuentra en el panel principal. Tiene dos modos de operación Manual y Automático.

En el modo manual se puede activar el ciclo de retrolavado pulsando el botón de *Arranque/Paro*, esto da inicio al proceso, el cual una vez iniciado, no se puede detener excepto con el paro de emergencia de las bombas de agua cruda.

En modo automático el ciclo de retrolavado se realiza una vez diaria a las 9 am y al igual que en el modo manual solo se puede detener con el paro de emergencia, siempre y cuando el nivel TAP no indique vacío (<60 cm).

El proceso de retrolavado consiste en 4 etapas:

- Retrolavado (15 minutos)
- Pausa (15 minutos)
- Enjuague (5 minutos)
- Servicio

La presión de entrada y salida en la válvula multipuerta debe estar en el rango de 15 a 25 psi para un correcto funcionamiento.

El paro de emergencia de las bombas de agua cruda detiene el proceso de retrolavado.

Si por algún motivo el ciclo de retrolavado es interrumpido es probable que la válvula multipuerta quede en una posición incorrecta, para volverla a colocar en posición de Servicio es necesario activar las bombas de agua cruda en modo manual y cerrar paulatinamente la válvula manual que se encuentra en la salida del drenaje, hasta que el problema quede resuelto.

2.6 Operación normal

En operación normal no debe existir ningún tipo de alarma o falla en el sistema de potabilización y todos los selectores deben estar colocados en modo automático.

Partiendo del supuesto que el nivel TAC indica vacío (<60 cm) esto da inicio al proceso de llenado del tanque de agua cruda por lo que se envía la señal de apertura de la válvula neumática la cual tarda 1 minuto en abrirse. Cuando la válvula está abierta más de 25% y el flujo es mayor que 300 l/min se activan las bombas de dosificación. El pH puede tardar hasta 5 minutos en establecerse y el tiempo de llenado total del TAC es de aproximadamente 5 horas, a una tasa constante de flujo aproximadamente de 1000 l/min. Una vez que se ha llegado al máximo del nivel TAC (>237cm), se cierra la válvula neumática deteniendo las bombas de dosificación. De aquí se activa el tiempo de espera de 6 horas para que los químicos actúen, una vez transcurrido este tiempo y si el nivel TAP es menor al mínimo (184 cm), una de las bombas de agua cruda entra en operación haciendo circular el agua desde el TAC pasando por el filtro de lecho múltiple y de allí hacia el TAP. La bomba se desactivará hasta que el nivel TAP llegue a su máximo (>234 cm).

Por otra parte el nivel del TH estará variando entre 60 y 90 cm dependiendo de la demanda de consumo de agua, siempre y cuando el nivel TAP no indique vacío.

CAPITULO 3: FALLAS

Se recomienda que en el caso de existir una falla verificar el origen de la misma en el centro de control, donde se especifica el tipo de alarma o fallo activo.

3.1 Bombas de agua cruda

Si la luz de fallo de la bomba de agua cruda (BAC) se encuentra encendida, puede deberse a alguno de los siguientes factores:

- Fallo contactor BAC: se produce cuando se envía una señal de activación a alguna de las bombas y esta no se activa. Para reestablecer esta falla se pasa el selector del modo automático al modo manual o con el paro de emergencia.
- Fallo por disparo térmico BAC: Se produce por un sobrecalentamiento en la línea de alimentación asía alguna de las bombas de agua cruda. Su reestablecimiento se hace en el mismo contactor en el panel de potencia.
- Fallo por circuito abierto transmisor de nivel TAP: se produce cuando hay una apertura en el circuito de lazo de corriente. Para reestablecer esta falla se activa y desactiva el paro de emergencia de las BAC.
- Fallo transmisor de nivel TAP: se produce cuando la señal 4-20 sale del rango de 3.5 a 20.5 mA. Para reestablecer este fallo se activa y desactiva el paro de emergencia de BAC.

3.2 Bombas de agua de servicio

Cuando la luz indicadora de fallo de las bombas de servicio (BAS) se encuentra activa, puede deberse a alguna de las siguientes condiciones:

- Fallo contactor BAS: se produce cuando se envía la señal de activación a alguna de las bombas de agua de servicio y esta no se activa. Para

reestablecer este fallo se pasa el selector del modo automático al manual o activando y desactivando el paro de emergencia BAS.

- Fallo por disparo térmico BAS: Se produce por un sobrecalentamiento en la línea de alimentación asía alguna de las BAS. Su reestablecimiento se hace en el mismo contactor en el panel de potencia.
- Fallo circuito abierto transmisor de nivel TH o transmisor de presión: se produce cuando hay una apertura en el circuito de lazo de corriente. Para reestablecer esta falla se activa y desactiva el paro de emergencia de las BAS.
- Fallo transmisor de nivel TH o transmisor de presión: se produce cuando la señal 4-20 sale del rango de 3.5 a 20.5 mA. Para reestablecer este fallo se activa y desactiva el paro de emergencia de BAS.

3.3 Bombas de dosificación

Si se activan las tres luces falla en el sistema de dosificación pueden darse los siguientes motivos:

- Fallo por circuito abierto en pH-metro, flujímetro o transmisor de nivel TAC: se produce cuando hay una apertura en el circuito de lazo de corriente. Para reestablecer esta falla se activa y desactiva el paro de emergencia del panel local.
- Fallo en pH-metro, flujímetro o transmisor de nivel TAC se produce cuando la señal 4-20 sale del rango de 3.5 a 20.5 mA. Para reestablecer este fallo se activa y desactiva el paro de emergencia del panel local.

En caso de que las luces de las bombas dosificadoras se activen por separado, ver los siguientes casos:

3.3.1 Luz falla dosificación hipoclorito de calcio

- Fallo fusible: se produce cuando no le llega alimentación a alguna de las bombas de hipoclorito de calcio, esto puede darse cuando se quema el fusible de protección contra sobre carga. La falla se arregla cuando se reestablece la alimentación.

3.3.2 Luz falla dosificación sulfato de aluminio

- Fallo fusible: se produce cuando no le llega alimentación a alguna de las bombas de sulfato de aluminio, esto puede darse cuando se quema el fusible de protección contra sobre carga. La falla se arregla cuando se reestablece la alimentación.

3.3.3 Luz falla dosificación carbonato de sodio

- Fallo fusible: se produce cuando no le llega alimentación a alguna de las bombas de carbonato de sodio, esto puede darse cuando se quema el fusible de protección contra sobre carga. La falla se arregla cuando se reestablece la alimentación.
- Bajo carbonato: baja dosificación de carbonato de sodio. Se produce cuando la bomba de dosificación de carbonato de sodio esta trabajando a un máximo de velocidad y el pH es menor de 6.6 durante más de 10 minutos. Esto puede deberse principalmente a un problema en la bomba de dosificación de carbonato de sodio, ya sea por obstrucción en la línea de dosificación o por problemas en el diafragma de la bomba. Para reestablecer esta falla se puede pasar el selector de modo, de la bomba de carbonato de sodio, de automático a manual, o activando y desactivando el paro de emergencia del panel local.
- Alto carbonato: alta dosificación de carbonato de sodio. Se produce cuando la bomba de dosificación de carbonato de sodio esta trabajando a un mínimo de velocidad y el pH se encuentra por encima de 7.4 durante más de 10 minutos. Esto puede deberse principalmente a un problema en la bomba

de dosificación de sulfato de aluminio. Para reestablecer esta falla se puede pasar el selector de modo, de la bomba de carbonato de sodio, de automático a manual, o activando y desactivando el paro de emergencia del panel local.

3.4 Fallo filtro de lecho múltiple

La luz de fallo en el FLM puede ser activada por las siguientes situaciones:

- Fallo en el contactor de la bomba de retrolavado: esta se produce cuando se envía la señal de activación de la bomba y el contactor no se cierra. Para reestablecer esta falla se puede hacer de dos formas: pasando el selector de modo del FLM de automático a manual, o activando y desactivando el paro de emergencia de las bombas de agua cruda.
- Fallo por disparo térmico en la bomba de retrolavado: se produce por un sobrecalentamiento en la línea de alimentación de la bomba. Esta se reestablece en el mismo contactor en el panel de potencia.

3.5 Fallo válvula neumática

Cuando la luz de fallo de la válvula neumática se encuentra activa, al menos alguna de las siguientes condiciones debe presentarse:

- Fallo por circuito abierto: Se produce cuando se interrumpe el lazo de corriente de 4-20, en la señal de retorno de la válvula neumática.
- Fallo señal de retorno: fallo por sub o sobre rango. Se produce cuando la señal 4-20 sale del rango de 3.5 a 20.5 mA permitido.
- Fallo por diferencia: se produce cuando la señal de control y la señal de retorno de la válvula neumática, difieren en más de 3 mA después de 15 segundos de llegar a su posición de abierto o cerrado.

Para reestablecer estas fallas, se debe pasar el selector de modo de la válvula neumática, de automático a manual, o activar y desactivar el paro de emergencia.

CAPITULO 4: SISTEMA DE MONITOREO

El sistema de monitoreo consiste en una pantalla mímico desarrollada en la herramienta In Touch de Wondeware, la cual se encuentra instalada en el servidor Datalogger en el Centro de Control del Centro de Generación Miravalles.

Para acceder a la pantalla mímico del sistema de potabilización siga los siguientes pasos:

- a) En la pantalla principal presione el botón que indica *MIRAVALLES I*, como se muestra en al siguiente figura.



Figura 4.1 Pantalla principal

b) Luego presione el botón para *Monitoreo* en la parte inferior de la pantalla. Allí aparecerá una lista pantallas, presione el botón con el numero 7 para el *Sistema de Aguas* (ver Figura 4.2). Esto le permite ingresar a la pantalla principal de monitoreo del proceso de potabilización, que se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.2 Listas de las pantallas de monitoreo

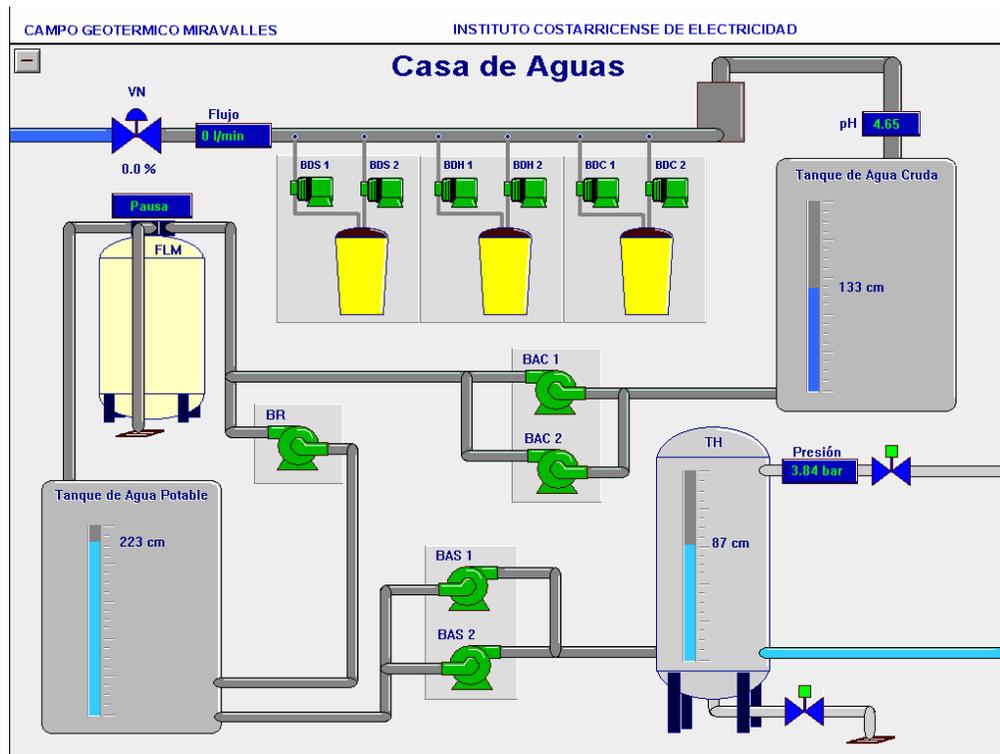


Figura 4.3 Pantalla del sistema de potabilización

En la pantalla principal del sistema de potabilización se muestran en su totalidad los elementos que lo conforman y que son controlados por el PLC. El sistema comienza su recorrido en la parte superior izquierda con la válvula neumática la cual da inicio al proceso de dosificación y de allí el proceso transcurre como fue explicado en la sección

2.6

Operación normal. El mímico es un reflejo de lo que ocurre en el sistema en tiempo real. Todas las señales provienen directamente del PLC.

4.1 Simbología

Dentro de la simbología básica que presenta el sistema de potabilización en la pantalla mímico principal se encuentra lo siguiente:

Tabla 4.1 Simbología para las Válvulas

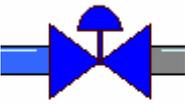
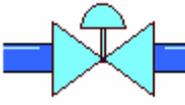
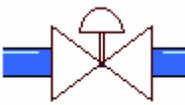
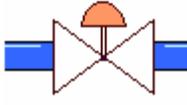
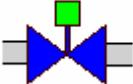
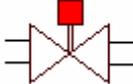
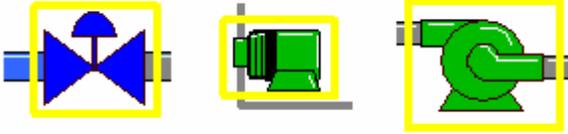
Válvula	Cerrado	Entre abierto	Abierto	Falla
Neumática	 0.0 %	 63.0 %	 100 %	 100 %
Solenoide		N.A.		N.A.

Tabla 4.2 Simbología para las bombas

Bomba	Apagado	Encendido	Falla
Agua cruda Servicio Retrolavado			
Dosificación			

Tabla 4.3 Otro tipo de simbología

Símbolo	Descripción
	<p>Cuando aparece un cuadro amarillo alrededor de un elemento, esto es producido cuando hay una situación anómala en el sistema debida a dos posibilidades: el paro de emergencia esta activo, o el selector se encuentra en modo manual</p>
	<p>El tanque de dosificación puede presentar dos estados: rojo cuando se encuentra vacío y amarillo cuando todavía tiene químico</p>

4.2 Ventanas Auxiliares

Estas despliegan información adicional como el modo de operación manual o automático, selectores de bomba, señales 4-20, volumen efectivo de los tanques, y paradas de emergencia. Para acceder a estas ventanas basta con posicionarse encima de algún elemento y dar un clic al *Mouse*. A continuación se describen algunas ventanas.

4.2.1 Válvula neumática

En la Figura 4.4, se muestran características propiamente de la VN, como lo es el modo manual o automático, paro de emergencia y señales 4-20 tanto de control (entrada) como de realimentación (salida).



Figura 4.4 Ventana auxiliar para la válvula neumática

4.2.2 Flujímetro y pH-metro

En caso de los medidores de flujo y pH se muestra las señales 4-20 que recibe el PLC según corresponda (ver Figura 4.5).



Figura 4.5 Ventanas auxiliares para los medidores de flujo y pH

4.2.3 Tanques de agua cruda y potable

La ventana auxiliar de los tanques de agua cruda y agua potable, presentan el volumen efectivo de agua que se encuentra en el tanque y la señal 4-20 del transmisor de nivel que llega al PLC (ver Figura 4.6).

El volumen efectivo se refiere a la cantidad de volumen utilizable que se encuentra en el tanque, que no es lo mismo, que la cantidad de volumen total. El volumen

efectivo cuenta a partir del nivel vacío, que para ambos tanques es de 60 cm, según indica el transmisor de nivel (ver Figura 4.7).

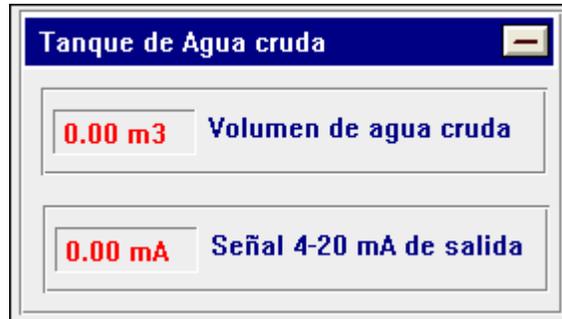


Figura 4.6 Ventana auxiliar para el tanque de agua cruda

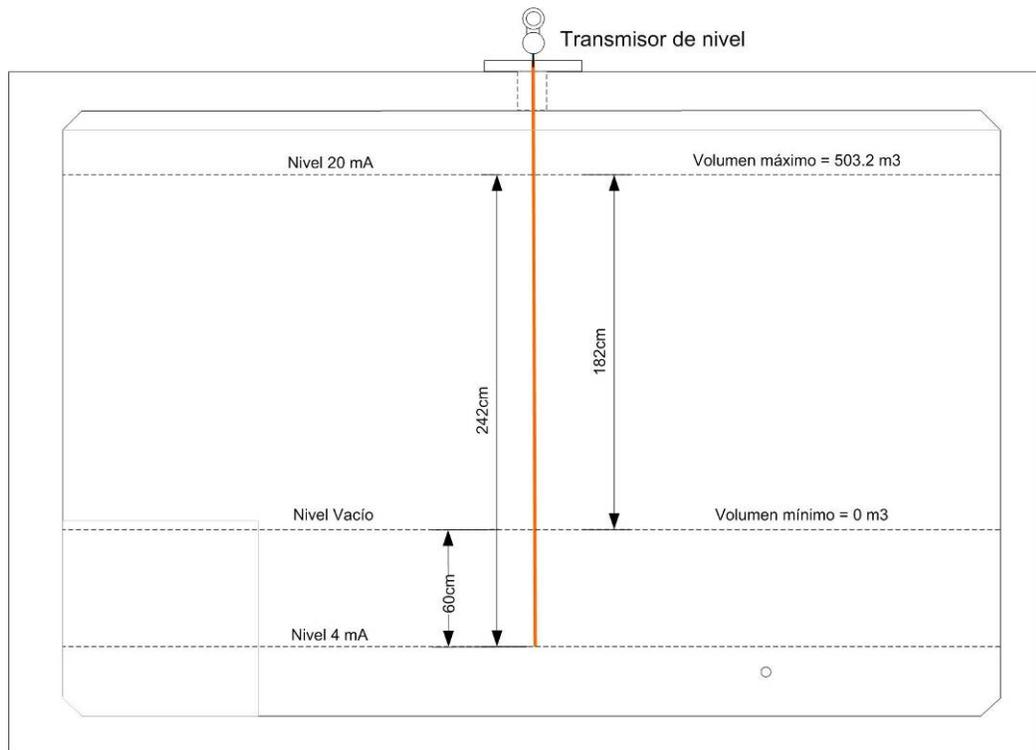


Figura 4.7 Ubicación del volumen mínimo y máximo en el tanque de agua cruda

4.2.4 Bombas de dosificación

Las ventanas auxiliares de las bombas de dosificación despliegan la misma información, como ejemplo, en la Figura 4.8, se brinda información respecto a la bomba de sulfato de aluminio, indicando el modo de operación manual o automático,

cual bomba esta seleccionada según el selector de bomba, la parada de emergencia, el agitador para el químico respectivo y las señales 4-20 que envía el PLC así las bombas. Es importante destacar que solo una bomba debe estar funcionando a la vez. Solo funcionará la bomba seleccionada excepto en el caso de que se produzca una falla en la misma.



Figura 4.8 Ventana auxiliar para la bomba de dosificación de sulfato de aluminio

4.2.5 Bombas de agua cruda, servicio y retrolavado

Para el caso de las bombas de agua cruda (Figura 4.9), servicio (Figura 4.10) y retrolavado (Figura 4.11), en las ventanas auxiliares se muestra el modo de operación manual o automático, así como la indicación del selector (bomba 1 o 2) y la parada de emergencia.



Figura 4.9 Ventana auxiliar para bombas de agua cruda



Figura 4.10 Ventana auxiliar para bombas de agua de servicio



Figura 4.11 Ventana auxiliar para bombas de retrolavado

4.2.6 Tanque hidroneumático

La ventana auxiliar del tanque hidroneumático presenta las señales 4-20 que llegan al PLC proveniente de los transmisores de nivel y presión (ver Figura 4.12).



Figura 4.12 Ventana auxiliar para tanque hidroneumático

4.3 Alarmas

Para ingresar en la sección de alarmas, en la pantalla principal se debe presionar el botón que indica *MIRAVALLS I* y luego el botón de *ALARMAS* que se encuentra en

la parte inferior de la pantalla. Este último despliega una lista similar al caso de monitoreo. Luego se presiona el botón 7 para *Sistema de Aguas* el cual desplegará la siguiente pantalla:

DD/MM HH:MM:SS.MSC	EVT	Comment	Name	GroupName
25/02 07:55:06.535	EVT	válvula neumatica cerrada	CDA_IND	CDA

HASTA AHORA, NO SE HA PRESENTADO
ALARMA NINGUNA EN ESTE GRUPO

Figura 4.13 Pantalla de alarmas para el sistema de potabilización

La pantalla de alarmas es de tipo historial y despliega la información necesaria para la detección de un fallo como lo es:

- Día, mes, hora: estos se despliega justo en el momento que es detectado el problema por el programa In Touch
- Evento: existe 4 tipos de eventos EVT, ALM, RTN y ACK. **EVT** se despliega en color amarillo, y se confiere a alguna actividad que se esta realizando, a modo de información. **ALM**, son de color rojo, se refiere a alguna alarma que hay que ponerle atención. **RTN**, son de color azul, y se refiere a alarmas que fueron reestablecidas. **ACK**, son de color verde, se producen

cuando se presionan el botón *RECONOCER*, siempre y cuando exista alguna alarma activa en ese momento.

- Comentario: Presenta una descripción del tipo de alarma o evento
- Nombre: despliega el *Tagname*, o nombre con el que es conocido la alarma o evento, en el diccionario de variables del programa In Touch
- Nombre de grupo: se refiere al nombre del grupo al que están asociadas las alarmas. En el caso de del sistema de potabilización, el nombre de grupo es: **CDA**.

Cuando no se encuentra activa ninguna alarma se despliega el siguiente mensaje en la parte central de la pantalla: *HASTA AHORA, NO SE HA PRESENTADO ALARMA NINGUNA EN ESTE GRUPO*.

Un ejemplo más detallado se puede ver en la Figura 4.14 la cual presenta un grupo de alarmas y eventos tomados durante el proceso de prueba. En este caso se produjo un larga lista de eventos y alarmas, sin embargo al final todas las alarmas fueron reestablecidas por lo que aparece el rotulo que indica que ninguna alarma se encuentra activa.

CAMPO GEOTERMICO MIRAVALLS		INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD	
Reconocer		Sistema de Aguas	
DD/MM	HH:MM:SS.MSC	EVT Comment	Name GroupName
24/02	07:49:00.131	ACK Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	07:53:04.903	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	07:53:04.903	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	08:17:07.918	ALM Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	08:17:07.918	ALM Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	08:19:28.920	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	08:19:28.920	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	10:06:26.108	EVT válvula neumática cerrada	CDA_IND CDA
24/02	10:06:29.993	EVT válvula neumatica cerrada	CDA_IND CDA
24/02	11:21:25.237	ALM Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	11:21:27.180	ALM Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	11:27:51.182	RTN Circuito abierto transm Valv Neumatica	CDA_FAL CDA
24/02	11:27:51.182	RTN Fallo en válvula neumática	CDA_IND CDA
24/02	13:29:17.720	ALM alta concentración de carbonato de sodio	CDA_IND CDA
24/02	13:29:26.582	EVT válvula neumática abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	13:30:18.617	EVT válvula neumatica abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	13:42:40.684	ALM alta concentración de carbonato de sodio	CDA_ALT CDA
24/02	13:45:24.600	RTN alta concentración de carbonato de sodio	CDA_ALT CDA
24/02	14:36:11.701	ALM baja concentración de carbonato de sodio	CDA_BAJ CDA
24/02	14:38:19.185	RTN baja concentración de carbonato de sodio	CDA_BAJ CDA
24/02	14:57:00.637	RTN Baja presion en tanque hidroneumatico	CDA_IND CDA
24/02	14:57:07.708	EVT válvula neumatica abierta un 100%	CDA_IND CDA
24/02	14:58:43.605	EVT válvula neumatica cerrada	CDA_IND CDA
24/02	15:15:52.715	ALM Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	15:42:49.730	RTN Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	15:43:24.871	ALM Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
24/02	16:02:32.912	ACK Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA
25/02	04:53:48.783	RTN Nivel TAC por encima de lo normal	CDA_IND CDA

Figura 4.14 Alarmas y eventos durante el proceso de prueba

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD

Centro de Generación Miravalles



**Manual de Mantenimiento
Sistema de potabilización y suministro de agua**

Andrés Sancho Salazar

**22-2-2005
Fortuna, Bagaces**

ÍNDICE

CAPITULO 1: Introducción.....	173
CAPITULO 2: Software	174
2.1 Direccionamiento.....	174
2.1.1 Direccionamiento externo	174
2.1.2 Direccionamiento interno	177
2.2 Principales instrucciones	179
2.3 Descripción del programa escalera	183
2.3.1 Archivo PRINCIPAL.....	185
2.3.2 Archivo CONFIG.....	185
2.3.3 Archivo BOTONES	187
2.3.4 Archivo NIVEL TAC	187
2.3.5 Archivo NIVEL TAP	187
2.3.6 Archivo NIVEL TH.....	188
2.3.7 Archivo CTRL FLM	188
2.3.8 Archivo CTRL PH	189
2.3.9 Archivo AGITADORES	190
2.3.10 Archivo ALARMAS	190
2.3.11 Archivo LUCES	191
2.3.12 Archivo OP_MATH.....	194
2.3.13 Archivo CTRLBDH	195
2.3.14 Archivo CTRLBDS	195
2.4 Descarga del programa escalera.....	195
2.5 Búsqueda de fallas	198
2.5.1 Procesador SLC 5/03	198
2.5.2 Programa escalera	201
CAPITULO 3: Comunicación.....	203
3.1 Configuración de los controladores de comunicación	203
3.1.1 Configuración de los controladores vía RS232.....	205

3.1.2	Configuración de controladores vía AIC+ (DH485).....	207
3.2	Comunicación con Wonderware	208
CAPITULO 4: Tablas de Variables.....		211
4.1	Variables externas del PLC	211
4.2	Variables de Wonderware	217
CAPITULO 5: Calibración de dispositivos.....		221
5.1	Calibración del medidor de flujo	221
5.2	Calibración del medidor de pH	223
5.3	Calibración de los transmisores de nivel	227

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

El presente manual pretende ser una guía en la búsqueda de soluciones a problemas que se puedan presentar durante una operación normal del sistema de potabilización. Tiene un amplio énfasis en la búsqueda de soluciones por medio de la utilización de herramientas de software como el RSLogix. En las primeras secciones se muestra una breve explicación del direccionamiento y las instrucciones utilizadas dentro del programa escalera que controla el sistema de potabilización. Luego hace referencia a cada una de las parte del programa y especifica su función.

Como última parte del manual se habla de las estrategias de calibración sugeridas por los fabricantes y que fueron implementadas durante las puesta en marcha del proyecto, se habla específicamente de la calibración de los medidores de flujo y pH además de los transmisores de nivel capacitivos, colocados en los tanques de almacenamiento de agua.

CAPITULO 2: SOFTWARE

2.1 Direccionamiento

En el PLC del sistema de potabilización existen dos tipos de direccionamiento:

- Externo: cuando se acceden a módulos externos que se encuentran en el chasis del PLC. Estos son los que tienen contacto directo con los elementos de campo.
- Interno: cuando se acceden a archivos en memoria, se utilizan para manipular datos y dar forma al programa.

2.1.1 Direccionamiento externo

El PLC instalado en el proceso de potabilización, esta estructurado en dos chasis de 10 ranuras cada uno, como se muestra en la Figura 2.1. En cada ranura se pueden ubicar indistintamente, módulos de entradas y salidas, a excepción de la ranura 0 que es exclusiva para el módulo del procesador. En la **Tabla 2.1**, se muestra la distribución y tipo de módulo utilizado por ranura. El direccionamiento de los módulos externos depende de su ubicación física, y el tipo de módulo a acceder.

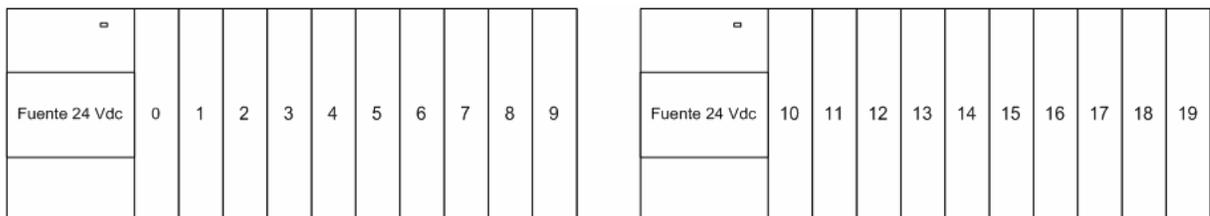


Figura 2.1 Distribución de las ranuras en el PLC del sistema de potabilización

Tabla 2.1 Ubicación de módulos por ranura

Ranura	Módulo	Nº de catálogo	Descripción
0	Procesador SLC 5/03	1747-L532	Procesador con puertos RS232 y DH485. 16Kbytes de memoria total
1,2,3,4	Entradas discretas	1746-IB16	Cada tarjeta con 16 entradas
5,6	Libres	---	---
7,8,9	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
10,11,12,13,14	Libres	---	---
15,16	Entradas Analógicas	1746-NI8	Cada tarjeta con 8 entradas
17,18,19	Salidas Analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas

2.1.1.1 Módulos de entrada y salida discretos

Este tipo de módulos por lo general se acceden bit a bit, cada número de bit corresponde exactamente al número de terminal física presente en el modulo, por lo que la capacidad máxima de bits depende del módulo mismo. El formato de direccionamiento se describe en la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Formato de direccionamiento para módulos de entrada y salida discretos

Formato	Explicación	
O:e.s/b I:e.s/b	O	Salida
	I	Entrada
	:	Delimitador de elemento
	e	Número de ranura
	.	Delimitador de palabra
	s	Numero de palabra
	/	Delimitador de bit
	b	Número de Terminal (0-15)

Ejemplos de direccionamiento:

O:2/6 = O:2.0/6	Salida 6, palabra 0, ranura 2
O:9/14	Salida 14, ranura 9
I:4/9	Entrada 9, ranura 4
I:1/12	Entrada 12, ranura 1

2.1.1.2 Módulos de entrada y salida analógicos

En estos módulos, por lo general, a cada salida o entrada le corresponde una palabra de bits (16bits). El formato de direccionamiento es idéntico a la **Tabla 2.2** para entradas y salidas discretas, solo que para este caso, no se acceden bits sino palabras.

El número de la palabra, corresponde al número de entrada físico presente en el modulo analógico.

Ejemplos de direccionamiento:

O:17.3	Palabra 3, ranura 17
O:19.0	Palabra 0, ranura 19
I:15.2	Palabra 2, ranura 15
I:16.7	Entrada 1, ranura 16

2.1.2 Direccionamiento interno

2.1.2.1 Archivos de estado

Este tipo de archivos son exclusivamente para monitoreo, no se pueden modificar. En general presentan información del procesador.

Tabla 2.3 Formato de direccionamiento para archivos de estado

Formato	Explicación	
S:e.s/b	S	Archivo de estado
	:	Delimitador de elemento
	e	Número de elemento
	/	Delimitador de bit
	b	Número de bit (0-15)

Ejemplos de direccionamiento:

S:1/15 Elemento 1, bit15. Este es el bit de “primer paso” utilizado para iniciar instrucciones en el programa

S:40 Elemento que almacena la hora del procesador

2.1.2.2 Archivos de Bit

El archivo 3 constituye el archivo de bit predeterminado, se utilizan por lo general para lógica de relé. El tamaño máximo es de 256 elementos de 1 palabra, para un total de 4096 bits. Existen dos formas de direccionamiento: accediendo al bit (0-15) de un elemento (0-255) o directamente al bit (0-4095) del archivo. En la **Tabla 2.4** aparece el formato de direccionamiento.

Tabla 2.4 Formato de direccionamiento para archivos de Bit

Formato	Explicación	
B3:e/b	B	Archivo de bit
	:	Delimitador de elemento
	e	Número de elemento
	/	Delimitador de bit
	b	Número de bit (0-15)

Ejemplos de direccionamiento:

B3:15/11 Bit 11, elemento 15
 B3:103/15 Bit 15, elemento 103
 B3:230/9 = B3/3689 Bit 9, elemento 230 o bit 3689

2.1.2.3 Archivos enteros

El archivo predeterminado es N7, por lo general se acceden por palabra, pero también pueden direccionarse bits. Cada archivo posee un máximo de 256 palabras. En la **Tabla 2.5** se presenta el formato de direccionamiento.

Tabla 2.5 Formato de direccionamiento para archivos de enteros

Formato	Explicación	
Nf:e/b	N	Archivo de enteros
	f	Número de archivo
	:	Delimitador de elemento
	e	Número de elemento
	/	Delimitador de bit
	b	Número de bit (0-15)

Ejemplos de direccionamiento:

N7:2/9 Bit 9, elemento 2, archivo de enteros 7
 N7:36 Elemento 36, archivo de enteros 7
 N10:3 Elemento 3, archivo de enteros 10

2.2 Principales instrucciones

El procesador SLC 5/03, cuenta con una gama bastante variada de instrucciones, dentro de los cuales a continuación se destaca algunos de ellos que son de importancia en el desarrollo del programa en el sistema de potabilización.

Tabla 2.6 Instrucciones de bit

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
	XIC	Examina si cerrado	Examina un bit para una condición activa
	XIO	Examina si abierto	Examina un bit para una condición desactiva
	OTE	Conecte salida	Activa o desactiva un bit
	OTL y OTU	Enclavamiento y desenclavamiento de salida	OTL activa un bit cuando el renglón es verdadero y OTU desactiva un bit cuando el renglón es verdadero Ambos retienen su estado incluso cuando el renglón pasa a falso
	OSR	Un frente ascendente	Ocasiona un evento de una sola vez

Tabla 2.7 Intrusiones del temporizador

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
	TON	Temporizador a la conexión	Cuenta los intervalos de la base de tiempo cuando la instrucción es verdadera
	RES	Restablecimiento	Pone a cero el valor acumulado y los bits de estado de un temporizador o contador

Tabla 2.8 Instrucciones de comparación

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
<p>EQU</p> <p>Equal</p> <p>Source A S:40</p> <p> 10<</p> <p>Source B 9</p> <p> 9<</p>	EQU	Igual	Prueba si dos valores son iguales
<p>LES</p> <p>Less Than (A<B)</p> <p>Source A I:15.2</p> <p> 17596<</p> <p>Source B 4000</p> <p> 4000<</p>	LES	Menor que	Prueba si el primer valor es menor que el segundo
<p>GRT</p> <p>Greater Than (A>B)</p> <p>Source A I:15.2</p> <p> 17596<</p> <p>Source B 20000</p> <p> 20000<</p>	GRT	Mayor que	Prueba si el primer valor es mayor que el segundo

Tabla 2.9 Instrucciones Matemáticas

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
<p>CLR</p> <p>Clear</p> <p>Dest B3:0</p> <p> 0000000000100000<</p>	CLR	Borrar	Pone todos los bits de una palabra a cero
<p>SCP</p> <p>Scale w/Parameters</p> <p>Input N10:29</p> <p> 15563<</p> <p>Input Min. 0.0</p> <p> 0.0<</p> <p>Input Max. 16383.0</p> <p> 16383.0<</p> <p>Scaled Min. 4000.0</p> <p> 4000.0<</p> <p>Scaled Max. 20000.0</p> <p> 20000.0<</p> <p>Output F8:10</p> <p> 20000.0<</p>	SCP	Escalar con parámetros	Produce un valor de salida escalado que tiene una relación lineal entre los valores de entrada

<p style="text-align: center;">SUB</p> <p>Subtract</p> <p>Source A F8:5 146.0<</p> <p>Source B F8:4 110.3263<</p> <p>Dest F8:6 35.67368<</p>	SUB	Resta	Resta la fuente B de la fuente A y almacena el resultado en el destino
<p style="text-align: center;">ABS</p> <p>Absolute Value</p> <p>Source N7:2 -3<</p> <p>Dest N7:3 3<</p>	ABS	Absoluto	Calcula el valor absoluto de la fuente y coloca el resultado en el destino

Tabla 2.10 Instrucciones de manejo de datos

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
<p style="text-align: center;">MOV</p> <p>Move</p> <p>Source 0.0 0.0<</p> <p>Dest F8:0 205.4429<</p>	MOV	Mover	Mueve el valor de la fuente al destino
<p style="text-align: center;">COP</p> <p>Copy File</p> <p>Source #N9:0</p> <p>Dest #O:15.0</p> <p>Length 8</p>	COP	Copiar el archivo	Copia datos del archivo de fuente al archivo de destino

Tabla 2.11 Instrucciones de flujo de programa

Símbolo	Mnemónico	Nombre	Descripción
<p>JSR</p> <p>Jump To Subroutine</p> <p>SBR File Number U:3</p>	JSR	Saltar a subrutina	Saltar a subrutina designada
<p>SBR</p> <p>Subroutine</p>	SBR	Subrutina	Se coloca al inicio de una subrutina
<p>RET</p> <p>Return</p>	RET	Retornar de subrutina	Se coloca al final de una subrutina
<p>IIM</p> <p>Immediate Input w/Mask</p> <p>Slot I:15.0</p> <p>Mask OFFFFh</p> <p>Length 1</p>	IIM	Entrada inmediata con mascara	Programar una entrada inmediata con mascara
<p>IOM</p> <p>Immediate Output w/Mask</p> <p>Slot O:19.2</p> <p>Mask OFFFFh</p> <p>Length 1</p>	IOM	Salida inmediata con mascara	Programar una salida inmediata con mascara

Tabla 2.12 Instrucción proporcional integral derivativa

Símbolo	Mnemónico	Descripción
<p>PID</p> <p>PID</p> <p>Control Block N10:0</p> <p>Process Variable N10:28</p> <p>Control Variable N10:29</p> <p>Control Block Length 23</p> <p>Setup Screen</p>	PID	Esta es una instrucción de salida que controla las características físicas, tales como temperatura, presión, caudal, pH usando lazos de proceso

2.3 Descripción del programa escalera

El programa desarrollado para el sistema de potabilización posee 14 archivos descritos en la **Tabla 2.13**. Estos archivos se pueden dividir en dos grupos:

- **Archivos de acondicionamiento:** son los encargados de la configuración y manipulación señales, para facilitar la programación de los archivos de control. Estos archivos son: PRINCIPAL, CONFIG, BOTONES, ALARMAS, LUCES Y OP_MATH
- **Archivos de control:** en estos se desarrollan los procedimientos de control. Es en donde se toman las decisiones para desarrollar una respectiva acción dependiendo de las condiciones de campo del sistema de potabilización. Dentro de estos se encuentran: NIVEL TAC, NIVEL TAP, NIVEL TH, CTRL FLM, CTRL PH, AGITADORES, CTRL BDH Y CTRL BDS

Tabla 2.13 Descripción de los archivos que conforman el programa escalera

Nº	Archivo	Nombre	Descripción
1	LAD 2	PRINCIPAL	Archivo principal. Contiene las llamadas a subrutina de los demás archivos
2	LAD 3	CONFIG	Realiza la configuración inicial de los módulos analógicos y borra el archivo de BIT utilizado
3	LAD 4	BOTONES	Contiene las instrucciones para los botones de los paneles principal y local
4	LAD 5	NIVEL TAC	Procedimiento que controla el nivel del tanque de agua cruda
5	LAD 6	NIVEL TAP	Procedimiento que controla el nivel del tanque de agua potable
6	LAD 7	NIVEL TH	Procedimiento que controla el nivel del tanque hidroneumático
7	LAD 8	CTRL FLM	Contiene las intrusiones que controlan el Filtro de Lecho Múltiple (FLM)
8	LAD 9	CTRL PH	Procedimiento que controla el pH en el proceso de dosificación
9	LAD 10	AGITADORES	Contiene instrucciones para el control de los agitadores
10	LAD 11	ALARMAS	Contiene los bits de activación de alarmas
11	LAD 12	LUCES	En este se encuentran los bits de salida que activan las luces de los paneles de control principal y local
12	LAD 13	OP_MATH	Contiene la mayor cantidad de operaciones matemáticas y de escalado
13	LAD 14	CTRL BDH	Contiene el control de la bomba de dosificación de Hipoclorito de calcio
14	LAD 15	CTRL BDS	Contiene el control de la bomba de dosificación de Sulfato de Aluminio

2.3.1 Archivo PRINCIPAL

En este archivo es en donde se pone en marcha el programa (archivo ejecutable), en este los demás archivos son llamados por medio de saltos a subrutina. Cualquier archivo adicional que no es llamado desde el archivo PRINCIPAL no será ejecutado. Cada archivo tiene asociado un numero de archivo el cual es utilizado para realizar los saltos a subrutina, por ejemplo el archivo LAD 3 CONFIG tiene como numero de archivo (*File Number*) U:3 ver Figura 2.1.

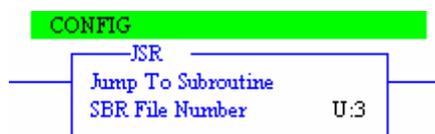


Figura 2.2 Salto a subrutina para el archivo CONFIG

2.3.2 Archivo CONFIG

Este archivo realiza la configuración de los módulos analógicos de entrada (número de catalogo 1746-NI8). Estos módulos tienen la capacidad de sensar diferentes tipos de señales de entrada, además de diferentes formatos para la manipulación de datos en el procesador:

Cada modulo tiene una tabla imagen de configuración, y puede ser acezada según el tipo de entrada que se quiere configurar. Por ejemplo, para la entrada I:15.0 existe una tabla imagen de configuración (o salida imagen) en O:15.0, y así para las demás entradas.

La forma más común para configurar estas entradas es utilizando un archivo de enteros, que para el caso del programa del sistema de potabilización, se usó el archivo *N9*, como se muestra en la Figura 2.3. Cada bit de este archivo se utiliza para la configuración según las especificaciones que se muestran en la **Tabla 2.14** tomado del manual *SLC 500 Analog Input Module* de Allen Bradley.

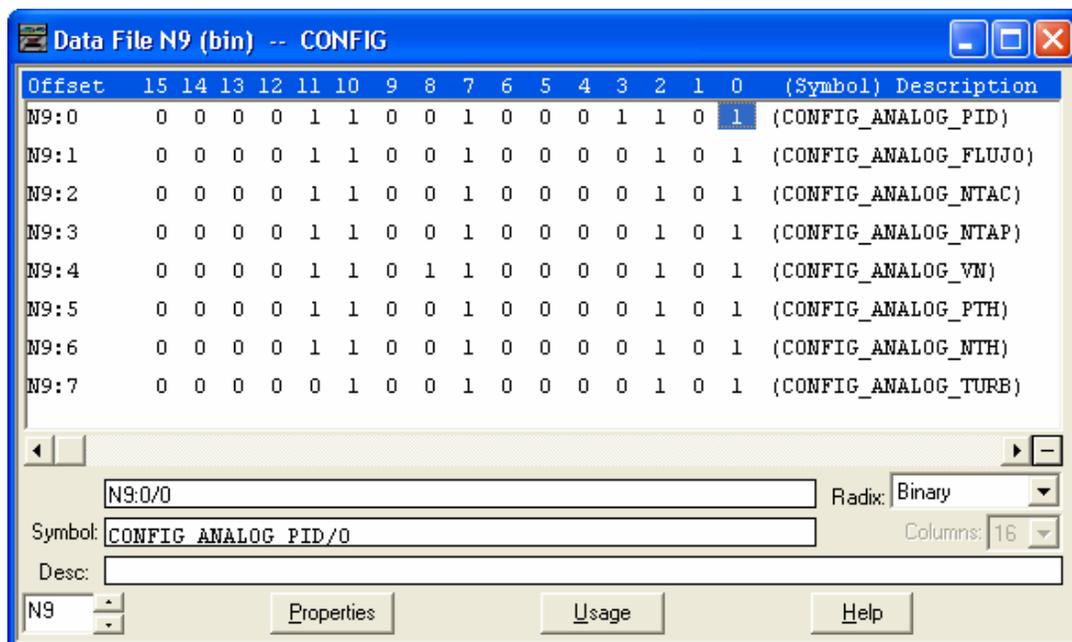


Figura 2.3 Vista del archivo N9 utilizado en la configuración del módulo analógico de entrada

Tabla 2.14 Definiciones de Bit para la configuración de las entradas del módulo analógico

Bits	Configuración	Descripción de bits		
0-2	Tipo de entrada	000 = ±10V dc 001 = 1-5V dc 010 = 0-5V dc	011 = 0-10V dc 100 = 0-20 mA 101 = 4-20 mA	110 = ±20 mA 111 = 0-1 mA
3-5	Formato de datos	000 = engineering units 001 = scaled_for_PID 010 = proportional counts 011 = 1746_NI4 data format 100 = user defined scaling		101 = user defined scaling 110 = illegal 111 = illegal
6 y 7	Circuito abierto	00 = zero 01 = upscale 10 = downscale 11 = illegal		
8-10	Filtro de frecuencia	000 = no filter 001 = 75 Hz 010 = 50 Hz	011 = 20 Hz 100 = 10 Hz 101 = 5 Hz	110 = 2 Hz 111 = 1 Hz
11	Habilitación de canal	0 = channel disabled 1 = channel enabled		
12-15	No se utilizan	0000 = always make this setting		

Para el desarrollo del proyecto de modernización de Casa de Aguas únicamente fue necesaria la utilización del módulo analógico de entrada que se encuentra en la ranura 15, el otro módulo (ranura 16) disponible se encuentra libre y sin configuración.

Todas las entradas del modulo analógico están configuradas para señales 4-20mA, y tienen un formato de datos con Unidades de Ingeniería a excepción de la entrada 0 que esta escalado para PID. El formato de las unidades de ingeniería es de 4000 a 20000 μ A y para el escalado PID de 0 a 16383 unidades.

2.3.3 Archivo BOTONES

Este archivo convierte los botones de pulso (*push button*) que se encuentran en los paneles principal y local, en botones retentivos (*toggle button*), esta acción permite que con un pulso de un botón se active un determinado bit y con otro pulso del mismo botón se desactive.

Como condición primordial los botones solo se activan si se encuentran en modo manual, y en el caso del botón para activar el ciclo retrolavado este queda inutilizable cuando se encuentra en el mismo ciclo.

2.3.4 Archivo NIVEL TAC

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Abre y cierra la válvula neumática de modo manual o automático.
- La apertura y cierre se realiza de manera paulatina utilizando los temporizadores *T10_TAC* y *T11_TAC* respectivamente.
- Se realiza escalado para la señal de la realimentación de la válvula neumática hacia el indicador de posición del panel local.
- Se activa el tiempo de espera de reposo del tanque de agua cruda (TAC) después de realizado el proceso de dosificación.

2.3.5 Archivo NIVEL TAP

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación y desactivación de las bombas de agua cruda 1 y 2 en modo manual o automático.
- Intercambio de bombas en caso de que alguna fallara.
- Activación intercalada.

2.3.6 Archivo NIVEL TH

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación y desactivación de las bombas de agua de servicio 1 y 2 en modo manual o automático.
- Intercambio de bombas en caso de que alguna fallara.
- Activación intercalada.

2.3.7 Archivo CTRL FLM

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación en modo manual y automático del ciclo de retrolavado.
- Activación de las electro-válvulas que controlan la válvula multipuerta del filtro de lecho múltiple.

En modo automático el ciclo empieza a una hora prefijada a las 9 de la mañana.

Cada etapa del ciclo tiene un temporizador asociado, el cual activa y desactiva tanto las electro-válvulas como la bomba de retrolavado según lo dispuesto en la **Tabla 2.15**.

Tabla 2.15 Estado de las electro válvulas y la bomba de retrolavado según las etapas del ciclo de retrolavado

Etapa	Bomba de retrolavado	Electro válvula			
		1	2	3	4
Retrolavado (15 min)	1	1	1	1	0
Pausa (15 min)	0	0	0	0	0
Enjuague (15 min)	1	0	1	0	1
Pausa (10 s)	0	0	0	0	0
Servicio (40 s)	1	0	0	0	0

Nota: 1=activo 0=desactivo

Las últimas dos etapas dispuestas en el ciclo se adicionaron para garantizar el cierre de la válvula multipuerta.

2.3.8 Archivo CTRL PH

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación manual y automática de las bombas de dosificación de carbonato de sodio (BDC).
- Tiene la instrucción PID encargada de controlar la BDC en modo automático.
- Activación de las alarmas BAJO_CARBONATO Y ALTO_CARBONATO

La instrucción PID posee una ventana donde presenta las características de configuración del PID (Setup Screen), esta se accede presionando doble clic del *mouse* encima de *Setup Screen* en la instrucción PID. Esto revela la ventana que se encuentra en Figura 2.1.

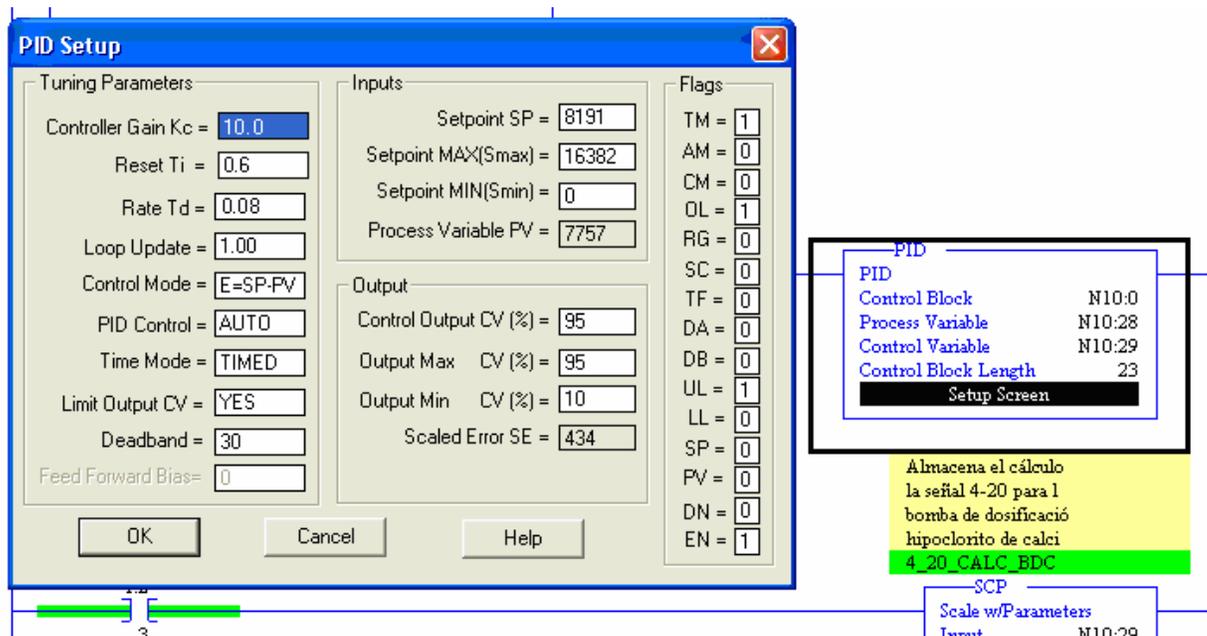


Figura 2.4 Ventana de configuración de la instrucción PID

Dentro de los principales parámetros se encuentran:

- La ganancia Kc: es la ganancia proporcional, con un rango de 0.1 a 25.5.
- El restablecimiento Ti: es la ganancia integral, con un rango de 0.1 a 25.5 minutos por repetición.

- Régimen Td: es el término derivativo. El rango de ajuste es 0.01 a 2.55 minutos.
- La banda muerta DB: se extiende sobre y debajo el punto de ajuste SP. Mientras la variable de proceso se encuentre dentro de la banda muerta el PID no realiza ningún cálculo.
- El punto de ajuste SP: es el punto de control deseado de la variable del proceso.

Para mayor información refiérase al capítulo 9 del manual *Juego de Instrucciones del SLC 500*, desarrollado por Allen Bradley.

2.3.9 Archivo AGITADORES

En este archivo se activa el control manual y automático de los agitadores de los tanques de dosificación. En el modo automático, el temporizador *T5_AGITA* activa los agitadores por 5 min (300 s) y el temporizador *T6_AGITA* crea un tiempo de espera de 10 min (600 s).

2.3.10 Archivo ALARMAS

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Se activan los fallos de contactor de las bombas de agua de servicio, agua cruda y retrolavado y su respectivo restablecimiento.
- Se activan los fallos de fusible de las bombas de dosificación.
- Se activan los fallos en la Válvula Neumática.
- Se activan los fallos de las entradas analógicas: circuito abierto y sobre o sub rango de la señal de entrada. Esta información proviene del módulo analógico de entrada.
- Se restablece las alarmas: la parada de emergencia del sistema de dosificación reestablece las alarmas por circuito abierto, sub rango o sobre rango de

la señal de 4-20mA, para los transmisores que intervienen en ese sistema: pH, Flujo, válvula neumática, y nivel del tanque de agua cruda.

- La parada de emergencia de las bombas de agua cruda reestablece las alarmas por circuito abierto, sub rango o sobre rango de la señal de 4-20mA, para el transmisor nivel del tanque de agua potable.
- La parada de emergencia del sistema de dosificación reestablece las alarmas por circuito abierto, sub rango o sobre rango de la señal de 4-20mA, para los transmisores que intervienen en ese sistema: presión y nivel.
- Se crea la alarma general para el cuarto de control en el TGP.

2.3.11 Archivo LUCES

En este archivo se activan las luces indicadoras de los paneles principal y local, como se indica a continuación:

- **Luz retrolavado:** indica cuando se encuentra en ciclo de retrolavado, se activa por medio del bit *BIT_PROS_RETRO* en el archivo de control *CRTL_FLM*.
- **Luz fallo FLM:** se activa cuando ocurre un fallo por disparo térmico o fallo en el contactor de la bomba de retrolavado, o cuando el paro de emergencia de las BAC se encuentra presionado.
- **Luz fallo BAC:** se activa cuando se produce un fallo por disparo térmico o fallo en el contactor en alguna de las dos bombas de agua cruda, cuando el transmisor de nivel del tanque de agua potable se encuentra en circuito abierto o señal fuera de rango, cuando el paro de emergencia de las BAC se encuentra presionado.
- **Luz operando BAC:** se encienden cuando alguna de las dos señales que se envían a los contactores de las bombas de agua cruda se encuentran activas.
- **Luz fallo BAS:** se activa cuando se produce un fallo por disparo térmico o fallo en el contactor en alguna de las dos bombas de agua de servicio, cuando el transmisor de nivel del tanque hidroneumático se encuentra en circuito abierto o

señal fuera de rango, cuando el transmisor de presión se encuentra en circuito abierto o señal fuera de rango, o cuando el paro de emergencia de las BAC se encuentra presionado.

- **Luz operando BAS:** se encienden cuando alguna de las dos señales que se envían a los contactores de las bombas de agua de servicio se encuentran activas.
- **Luz alto nivel TAC:** se establece cuando el nivel esta por encima de lo normal en el tanque de agua cruda, se activa por medio del bit *INDICA_SN_TAC* el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz bajo nivel TAC:** se establece cuando el nivel esta por debajo de lo normal en el tanque de agua cruda, se activa por medio del bit *INDICA_SUB_MIN_TAC* el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz alto nivel TAP:** se establece cuando el nivel esta por encima de lo normal en el tanque de agua potable, se activa por medio del bit *INDICA_SN_TAP* el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz bajo nivel TAP:** se establece cuando el nivel esta por debajo de lo normal en el tanque de agua potable, se activa por medio del bit *INDICA_SUB_MIN_TAP* el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz baja presión TH:** se establece cuando la presión esta por debajo de lo normal en el tanque hidroneumático, se activa por medio del bit *INDICA_SUB_PRES_TH* el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz bajo nivel TH:** se establece cuando el nivel esta vacio en el tanque hidroneumático, se activa por medio del bit *INDICA_VACIO_TH*, el cual es regulado en el archivo *OP_MATH*.
- **Luz fallo VN:** se activa por medio del bit *INDICA_FALLO_VN* el cual es regulado en el archivo *ALARMAS*, o cuando el paro de emergencia del panel local se encuentra presionado.
- **Luz fallo BDH:** se produce cuando se activa algún fallo por fusible en alguna de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio, cuando se activa el paro de emergencia del panel local, o cuando se produce un fallo por circuito abierto o señal fuera de rango en: medidor de pH, medidor de flujo, transmisor de nivel TAC.

- **Luz operando BDH:** se encienden cuando alguna de las dos señales que se envían a los relés para dar energía a las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio se encuentran activas.
- **Luz fallo BDS:** se produce cuando se activa algún fallo por fusible en alguna de las bombas de dosificación de sulfato de aluminio, cuando se activa el paro de emergencia del panel local, o cuando se produce un fallo por circuito abierto o señal fuera de rango en: medidor de pH, medidor de flujo, transmisor de nivel TAC.
- **Luz operando BDS:** se encienden cuando alguna de las dos señales que se envían a los relés para dar energía a las bombas de dosificación de sulfato de aluminio se encuentran activas.
- **Luz fallo BDC:** se produce cuando se activa algún fallo por fusible en alguna de las bombas de dosificación de carbonato de sodio, cuando se activa el paro de emergencia del panel local, cuando se produce un fallo por circuito abierto o señal fuera de rango en: medidor de pH, medidor de flujo, transmisor de nivel TAC, o cuando se activan los bits *BAJO_CARBONATO* o *ALTO_CARBONATO* los cuales se regulan en el archivo *CRTL_PH*.
- **Luz operando BDC:** se encienden cuando alguna de las dos señales que se envían a los relés para dar energía a las bombas de dosificación de carbonato de sodio se encuentran activas.
- **Luz bajo nivel TDC:** se enciende cuando el sensor indicador de bajo nivel del tanque dosificador de carbonato de sodio se activa.
- **Luz bajo nivel TDH:** se enciende cuando el sensor indicador de bajo nivel del tanque dosificador de hipoclorito de calcio se activa.
- **Luz bajo nivel TDS:** se enciende cuando el sensor indicador de bajo nivel del tanque dosificador de sulfato de aluminio se activa.

Las luces también se activan con el botón de prueba de luces, según corresponda en cada panel.

2.3.12 Archivo OP_MATH

Este archivo contiene la mayor cantidad de operaciones matemáticas y escalamiento que provienen de las señales 4-20 de los sensores de campo. Dentro de las acciones que se realizan en este archivo se encuentran:

- Escalamiento de nivel para los tanques de agua cruda, potable y hidroneumático, a unidades de centímetros.
- Escalamiento de volumen para los tanques de agua cruda y potable, a unidades de metros cúbicos.
- Escalamiento de la presión en el tanque hidroneumático a unidades bar.
- Determinación de los niveles mínimo, máximo, sub-mínimo y sobre máximo para los tanques de agua cruda, potable y hidroneumático.
- Determinación del nivel mayor a 85 cm en el tanque hidroneumático.
- Determinación de presión sub-baja, baja y alta.
- Indicación de cerrado y abierto de la válvula neumática a partir de la señal de realimentación proveniente de la misma.
- Escalado y comparación señales de salida y entrada de la válvula neumática.
- Escalado de las señales 4-20 asía el cuarto de control (TGP).
- Escalado del flujo a unidades de litros por minuto.
- Determinación de flujo bajo.

2.3.13 Archivo CTRL BDH

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación manual y automática de las bombas de dosificación de hipoclorito de calcio (BDH).
- Cálculo y escalamiento para la relación flujo de entrada versus flujo para BDH.

2.3.14 Archivo CTRL BDS

En este archivo se realizan las siguientes acciones:

- Activación manual y automática de las bombas de dosificación de sulfato de aluminio (BDS).
- Cálculo y escalamiento para la relación flujo de entrada versus flujo para BDS.

2.4 Descarga del programa escalera

Para poder descargar el programa escalera en los PLC Allen Bradley, se requiere de los siguientes paquetes de software:

- RSLinx: maneja los protocolos de comunicación entre PLC y PC
- RSLogix: en este se desarrolla y modifica el programa escalera, y es donde se realiza la descarga

Luego de haber establecido una correcta comunicación entre PC- PLC por medio del programa RSLinx, descrito en la sección *3.1 Configuración de los controladores de comunicación*, se puede proceder a la descarga del programa.

Procedimiento de descarga del programa escalera para el sistema de potabilización:

- a) Ingrese al programa RSLogix. Abra el archivo que contiene el programa para el sistema de potabilización con el nombre *CASAGUAS_FINAL.RSS*, esto abrirá dos ventanas: uno tiene la información del proyecto y el otro despliega el diagrama escalera de los archivos del programa, como se muestra en la Figura 2.5.

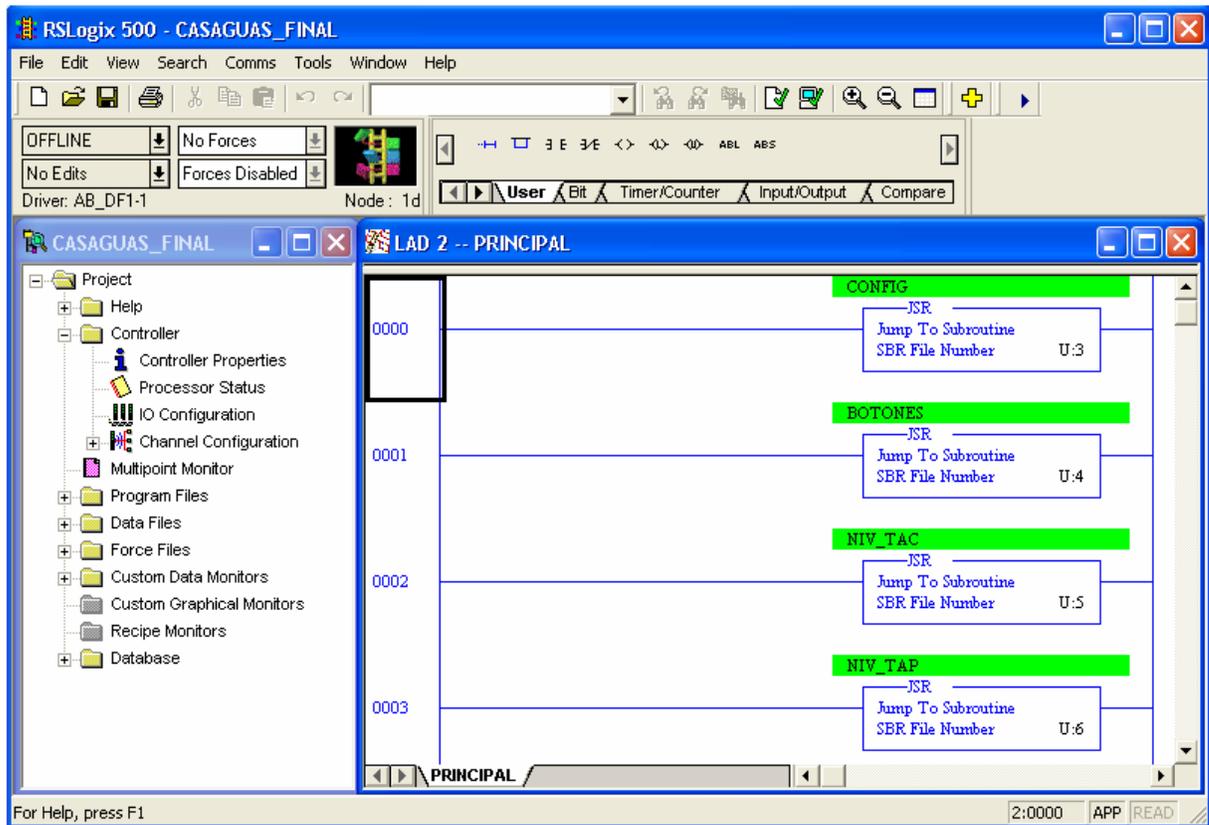


Figura 2.5 Vista inicial del programa RSLogix con el programa escalera CASAGUAS_FINAL

b) Antes de proceder a la descarga hay que configurar el *driver* de comunicación para el programa escalera. Para ello ingrese en *Controller Properties* en la ventana de la izquierda (ver Figura 2.5), esto despliega una nueva ventana, como la que se muestra en la Figura 2.6, aquí diríjase a la pestaña *Controller Communications* y a continuación escoja el driver de comunicación definido en el RSLinx y presione el botón *Aceptar*.

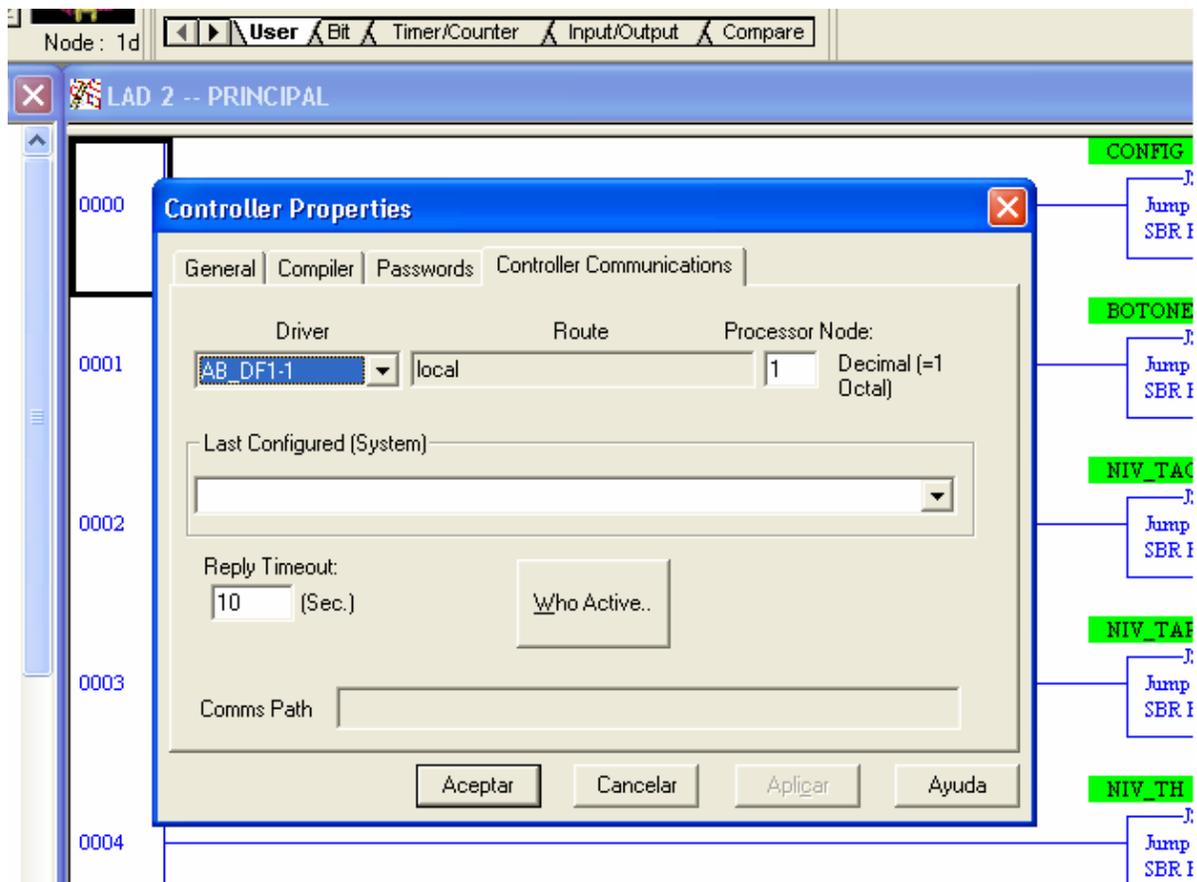


Figura 2.6 Ventana que despliega las propiedades del controlador

c) Ahora dirijase al menú principal, ingrese en *Comms* y luego presione *Download*, luego siga los cuadros de dialogo. Para poder descargar el programa es necesario que en el PLC (específicamente en el módulo del procesador), se encuentre en Modo REM o PROG, de lo contrario (modo RUN) se desplegará un mensaje de error indicando que no se puede continuar con la descarga. Para corregir este problema gire la llave que se encuentra en la parte superior del modulo del procesador en alguno de los modos antes mencionados.

2.5 Búsqueda de fallas

2.5.1 Procesador SLC 5/03

En el PLC el módulo principal es el procesador SLC 5/03, ya que almacena y ejecuta el programa, además de establecer los vínculos de comunicación. Este modulo puede indicar diferentes tipos de fallos, ya sea por medio de luces indicadoras en el módulo mismo o por códigos accesibles en el programa RSLogix.

Algunas de las fallas son indicadas en la parte superior del modulo como se muestra en la Figura 2.7. La descripción de las luces indicadoras se muestran en la Tabla 2.16. Para una mayor comprensión refiérase al capítulo 10 del Manual de Instalación y Operación de Hardware de estilo modular SLC 500.

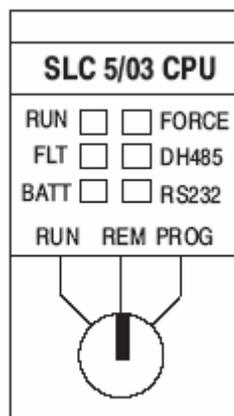


Figura 2.7 Luces indicadoras del modulo procesador SLC 5/03

Tabla 2.16 Descripción de las luces indicadoras del modulo del procesador SLC 5/03

LED	Estado	Descripción
RUN (color: verde)	Encendido (fijo)	El procesador esta en modo marcha
	Intermitente (durante operación)	El procesador esta transmitiendo un programa desde RAM al modulo de memoria
	Apagado	El procesador esta en un modo diferente al de marcha
FLT (color: rojo)	Intermitente (durante puesta en marcha)	El procesador no ha sido configurado
	Intermitente (durante operación)	Se detecta un error principal en el procesador, chasis de expansión o modulo de memoria
	Encendido (fijo)	Un error grave esta presente (no hay comunicación)
	Apagado	No hay errores
BATT (color: rojo)	Encendido (fijo)	El nivel de la batería esta por debajo del nivel de umbral, o la batería y el puente de la batería están ausentes o no conectados
	Apagado	La batería esta funcionando
DH-485 (color: verde)	Encendido (fijo)	El procesador esta comunicándose activamente en la red
	Intermitente	No hay otros nodo activos en la red
	Apagado	Un error fatal esta presente, no hay comunicaciones
RS-232 (color: verde)	Encendido (intermitente)	Se esta transmitiendo en la red
	Apagado	El procesador no esta transmitiendo

La otra forma de detectar fallas en el procesador es utilizando el código de error que se almacena en la palabra de estado S2:6. Para acceder esta palabra necesita los programas RSLinx y RSLogix para establecer comunicación con el PLC, además de la última versión del programa escalera. Una vez establecida la comunicación, tiene que asegurarse que el programa se encuentre conectado en línea (*Online*) con el PLC, para tener acceso al estado del procesador, siga los siguientes pasos:

- a) Asegúrese de tener bien configurado el *driver* de comunicación como se hizo en los pasos a y b de la sección 2.4 Descarga del programa escalera.
- b) En el menú principal ingrese en *Comms* y luego en *Go Online*. Esto le permite estar en línea con el procesador.

c) En el árbol principal del proyecto ingrese en *Processor Status*, y luego en la pestaña *Errors*, como se muestra en la Figura 2.8

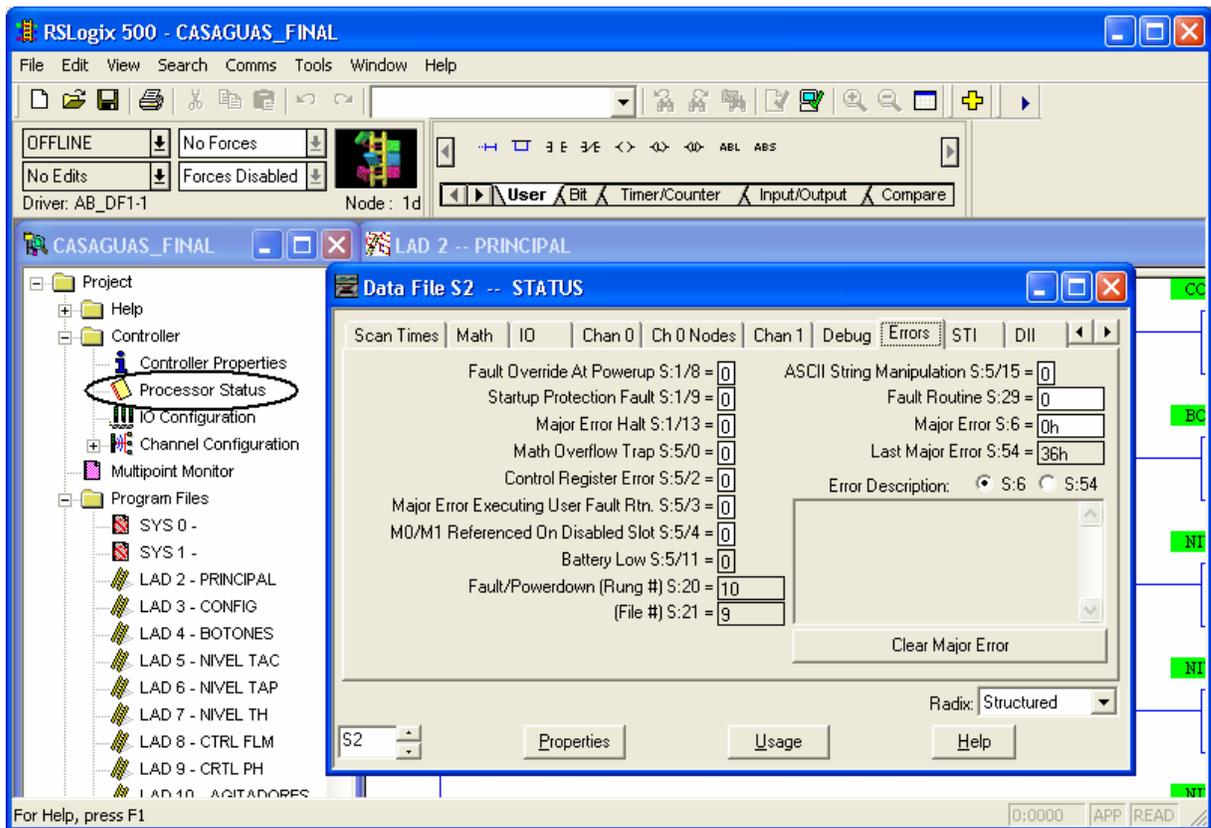


Figura 2.8 Descripción de errores en la ventana principal del estado del procesador

d) En esta venta se muestra los posibles errores que puede tener el procesador, la palabra S2:6 se muestra en la parte derecha con el nombre de *Mayor Error S:6*. Tome ese número, que se encuentra en hexadecimal, y refiérase al capítulo 13 del Manual de referencia del Juego de instrucciones del SLC 500, donde encontrará una descripción detallada de los pasos a seguir según el código que se presente.

2.5.2 Programa escalera

Para encontrar fallas en el programa, el RSLogix cuenta con herramientas de monitoreo que ayudaran a hacer más fácil la búsqueda. Estas herramientas funcionan conociendo la dirección de la variable que se desea monitorear

- **Multipoint Monitor:** puede editar una serie de direcciones de Bit que requieren ser monitoreados o incluso modificadas manualmente por medio del botón *Toggle Bit*. Para acceder este método, haga doble clic sobre el ícono de Multipoin Monitor en el árbol del proyecto como se muestra en la Figura 2.9.

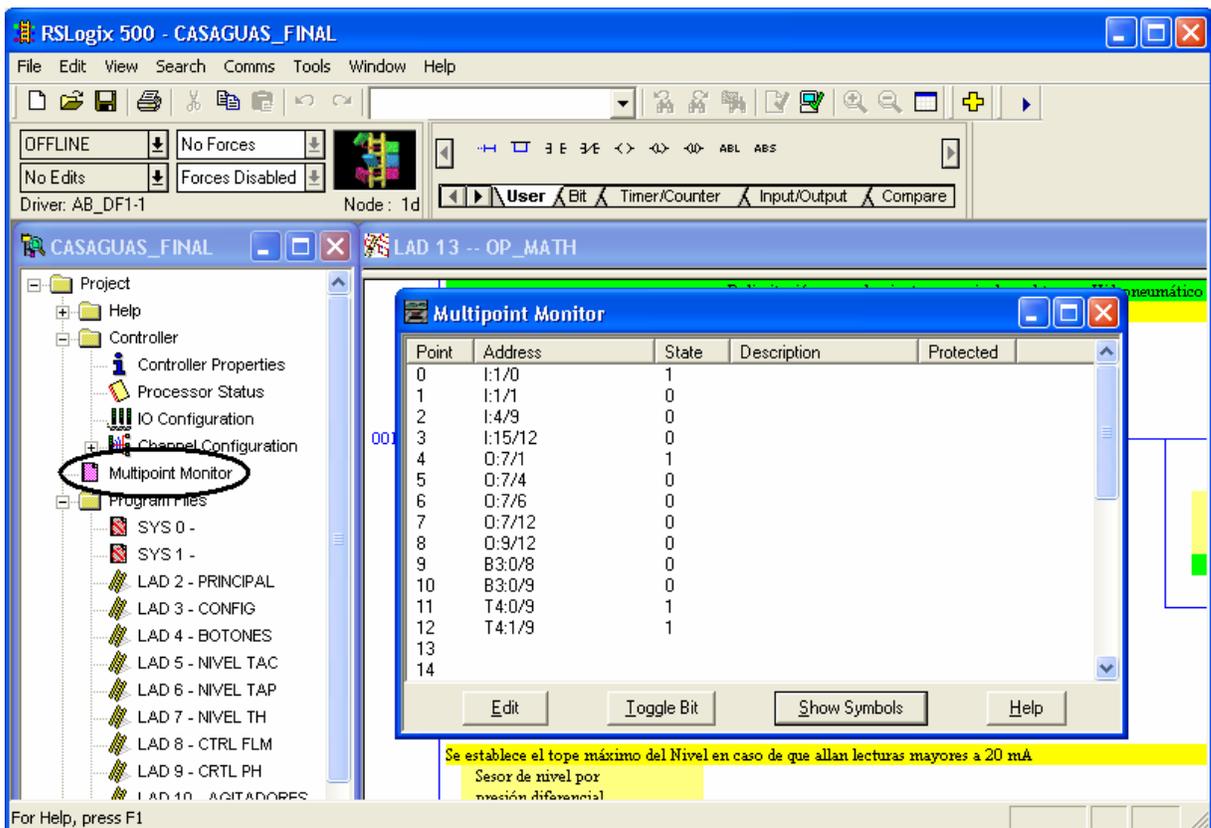


Figura 2.9 Ventana para Multipoint Monitor

- **Custom Data Monitor:** permite monitorear valores de datos decimales (entero o real), editando los datos en forma de lista de direcciones. Para acceder este

método haga doble clic sobre el ícono CDM 0 en el árbol del proyecto como se muestra en la Figura 2.10.

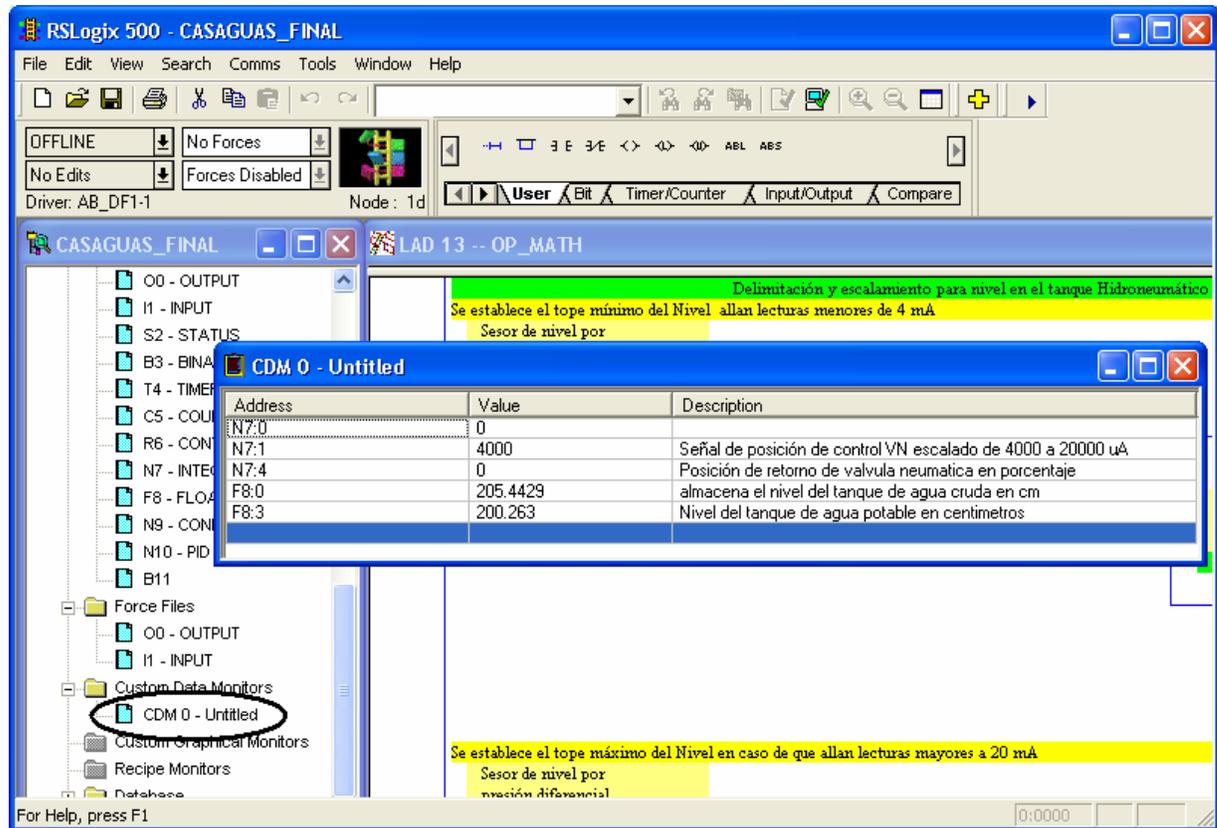


Figura 2.10 Ventana para Custom Data Monitor

Es importante por tomar en cuenta que, para poder observar los datos del PLC, este debe encontrarse en línea (Online) con el programa RSLogix para hacer esto diríjase a los pasos a y b de la sección anterior. Recuerde que se necesita la última versión del programa escalera que fue descargado en el PLC, de lo contrario le aparecerá un mensaje de error por incompatibilidad de programas.

CAPITULO 3: COMUNICACIÓN

3.1 Configuración de los controladores de comunicación

La configuración de los controladores (*driver*) de comunicación se realiza en el programa RSLinx. Para el sistema de potabilización existen dos vías de comunicación disponibles:

- Conexión directa PC-PLC por medio de protocolo DF1 utilizando un cable de conexión cruzado RS232 (ver Figura 3.1). El procesador SLC 5/03 permiten operar el protocolo de comunicación DF1 por medio del puerto de comunicación RS-232, canal 0.

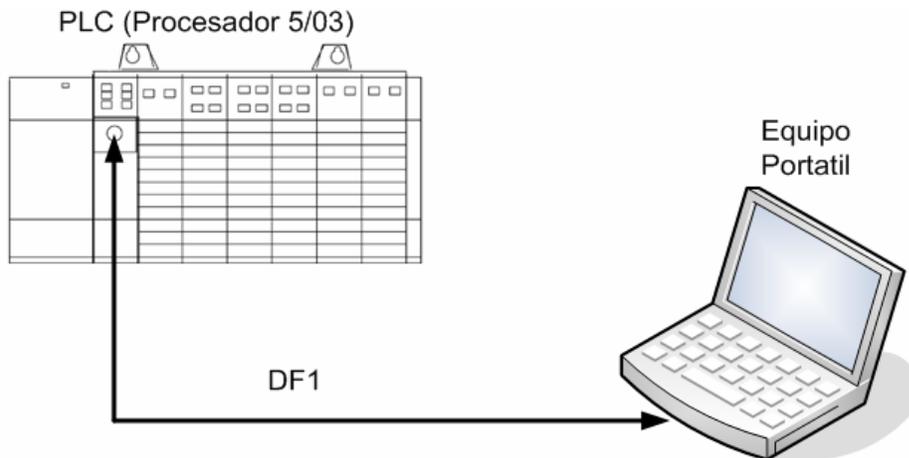


Figura 3.1 Conexión directa PC-PLC vía RS-232

- Conexión por medio del dispositivo AIC+, protocolo DH485 (ver Figura 3.2). Esta conexión es permanente ya que se utiliza en la comunicación PLC-*Wonderware*. El procesador SLC 5/03 tiene un canal DH-485 (conexión RJ-45, canal 1) que ofrece soporte a la red de comunicación DH-485.

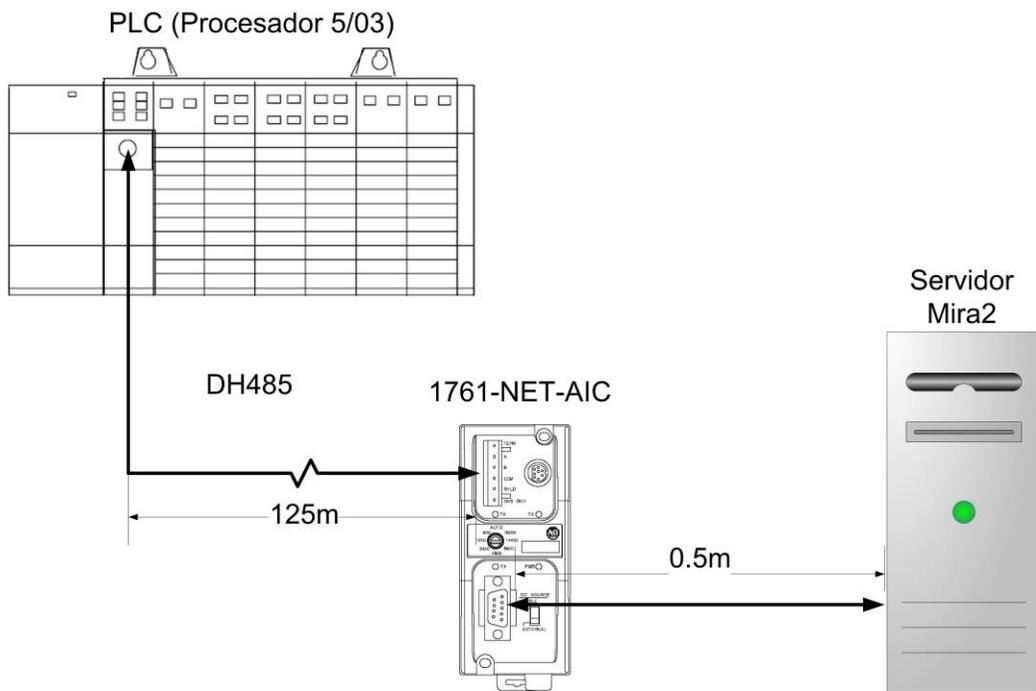


Figura 3.2 Conexión por medio del dispositivo AIC+ con el protocolo DH-485

En la Figura 3.3 muestra una vista frontal del módulo del procesador SLC 5/03 donde aparecen los dos canales disponibles de comunicación.

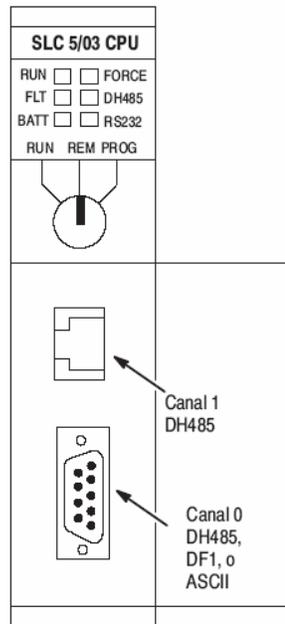


Figura 3.3 Canales de comunicación en le módulo SLC 5/03 del PLC en el sistema de potabilización

3.1.1 Configuración de los controladores vía RS232

Procedimiento para la configuración de los controladores RS232:

- a) Conecte el cable RS-232 cruzado entre la PC y el puerto RS-232 del PLC que se encuentra en el modulo del procesador
- b) Abra el programa RSLinx
- c) En el menú de *Communications* ingrese en *Configure Drivers*, eso le despliega una ventana como la que se muestra en la Figura 3.4. Si existe un driver para comunicación RS-232 diríjase al paso g. Por lo general estos driver tienen el nombre AB_DF1
- d) Escoja el driver *RS-232 DF1 devices* y luego presione el botón *Add New*
- e) Al hacer esto aparecerá una pequeña ventana donde puede ponerle nombre al controlador (*Device Name*), o preferiblemente dejar el sugerido como predeterminado (AB_DF1-1).

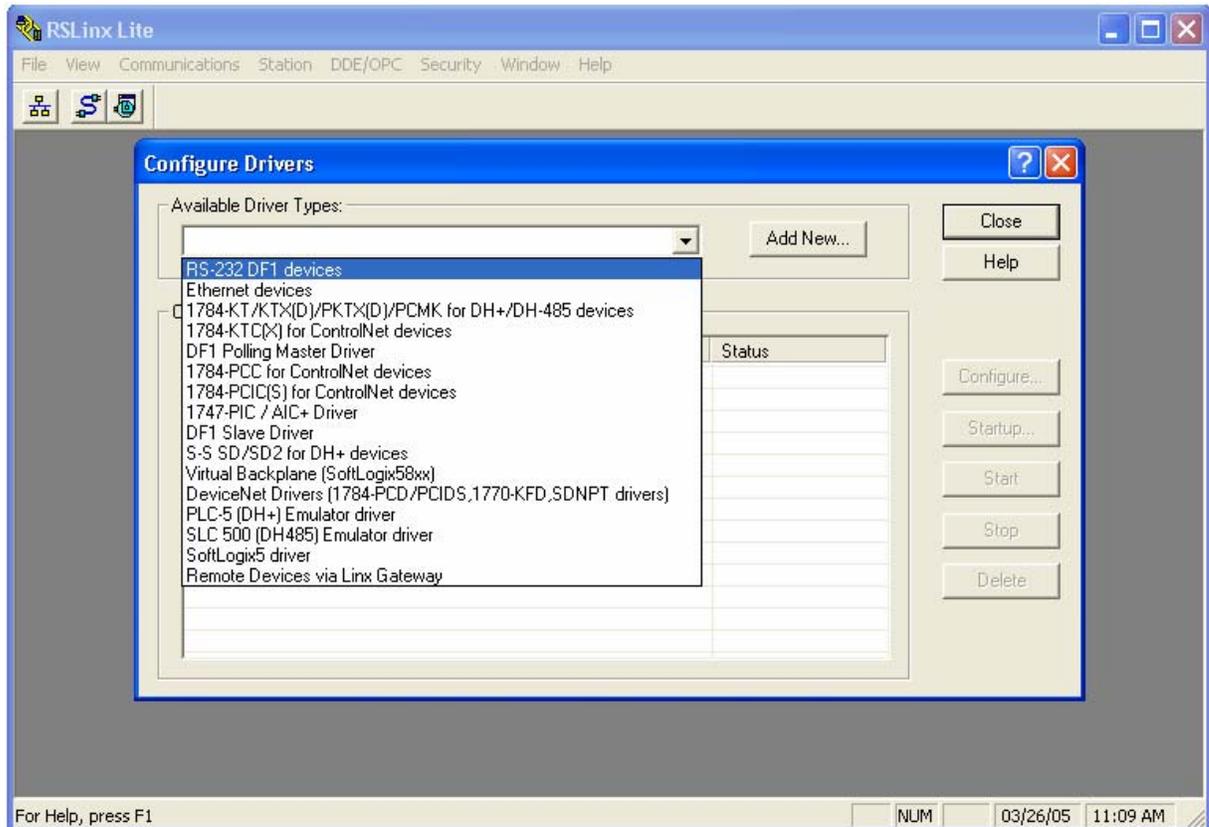


Figura 3.4 Ventana para la configuración de los controladores de comunicación

- f) Después de colocar el nombre, aparece la ventana de configuración (ver Figura 3.5), en esta escoja el puerto RS-232 que esta utilizando para comunicarse, y luego presione el botón *Auto-Configure*, esto debe desplegarle un mensaje que le indicará si se estableció o no comunicación con el PLC
- g) Verifique en la ventana principal de *Configure Drivers* (Figura 3.4), que el *driver* seleccionado, se encuentre en estado (*Status*) *Running*. Si no es así verifique que el puerto es el correcto. Otro problema ocurre cuando se utilizan convertidores USB-RS232 para la comunicación PC-PLC, ya que algunos omiten algunas señales de comunicación necesarias.
- h) Para verificar la conexión, en el menú *Communication* ingrese en *RSWho*, allí aparecerán los *drivers* configurados. En el *driver* con el nombre AB_DF1-1 debe aparecer el PLC que se encuentra conectado, si el *driver* esta bien configurado la detección es automática.

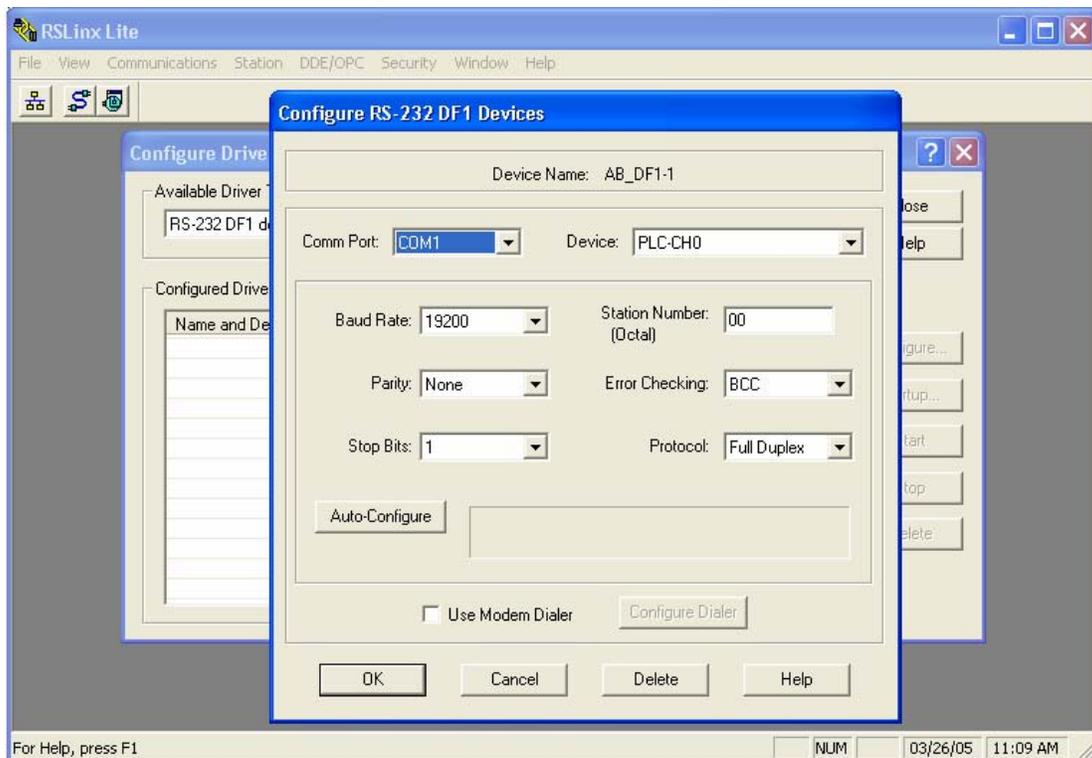


Figura 3.5 Ventana de configuración del controlador RS-232

3.1.2 Configuración de controladores vía AIC+ (DH485)

Siga los siguientes pasos para una correcta configuración:

- a) Abra el programa RSLinx. En el menú *Communication* abra la ventana *Configure Drivers*
- b) Dentro de los *drivers* disponibles escoja el *1747-PIC / AIC+ driver*, y luego presiones el botón *Add New* (ver Figura 3.4) con esto aparecerá una pequeña ventana donde se coloca el nombre del driver. Por lo general se deja el predeterminado *AB_PIC-1*
- c) Luego aparece la ventana de configuración del *driver* donde se escoge el puerto de comunicación, como lo muestra la Figura 3.6. No modificar los otros parámetros.

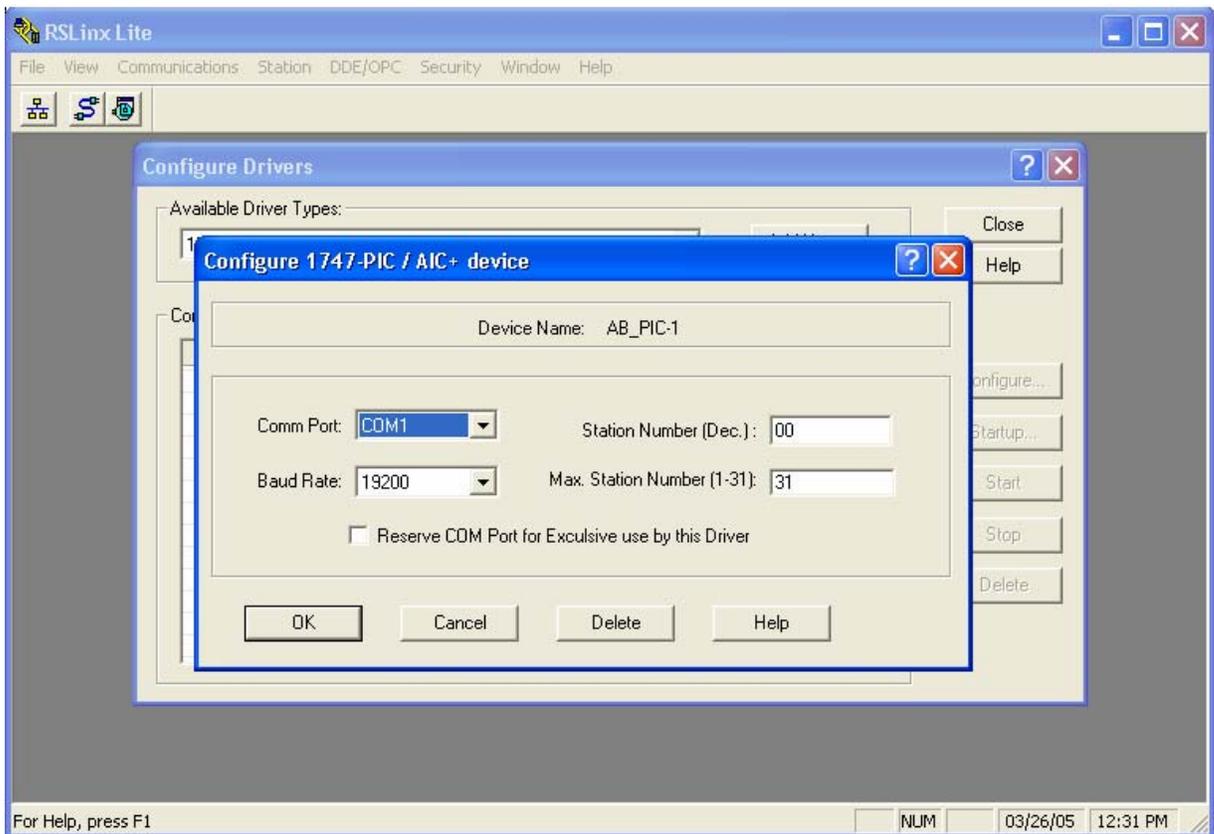


Figura 3.6 Ventana de configuración para el controlador DH485

d) Verifique en la ventana principal de *Configure Drivers*, que el *driver* seleccionado, se encuentre en estado (*Status*) *Running*. Si no es así verifique que el puerto es el correcto.

e) Para verificar la conexión, en el menú *Communication* ingrese en *RSWho*, allí aparecerán los *drivers* configurados. En el *driver* con el nombre AB_PIC-1 debe aparecer el PLC que se encuentra conectado, si el *driver* esta bien configurado la detección es automática.

3.2 Comunicación con Wonderware

La comunicación con Wonderware se realiza por medio de intercambio dinámico de datos DDE (Dynamic Data Exchange) entre el programa RSLinx en el servidor Mira2 y la herramienta In Touch en el Datalogger, como se muestran en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Diagrama de bloques para comunicación PLC-Wonderware

Para establecer comunicación entre el RSLinx y el In Touch para el sistema de potabilización, siga los siguientes pasos:

a) Establezca comunicación entre el PLC y RSLinx (ver sección 3.1.2 Configuración de controladores vía AIC+ (DH485)).

b) Ingrese un tópico en el programa RSLinx instalado en el servidor de Mira2. Para hacer esto abra el programa RSLinx, en el menú principal ingrese en *DDE/OPC*, y luego en *Topic Configuration*, luego ingrese un nuevo tópico que para el caso del sistema de potabilización es: CASAGUAS. Esto deja lista la aplicación para un intercambio dinámico de datos.

c) En el servidor Datalogger, abra la aplicación de WindowMaker de In Touch. En el menú principal ingrese en *Special*, y luego en *Access Names*. Presione el botón *Add* para ingresar uno nuevo, y realice la configuración como se muestra en la Figura 3.8.

The image shows a dialog box titled "Add Access Name" with a blue header. It contains the following fields and options:

- Access Name: CDA
- Node Name: Mira2
- Application Name: RSLinx
- Topic Name: CASAGUAS
- Which protocol to use:
 - DDE
 - SuiteLink
- When to advise server:
 - Advise all items
 - Advise only active items

Buttons: OK, Cancel

Figura 3.8 Configuración del *Access Name* para el sistema de potabilización

Antes de tener acceso a cualquier tipo de variable del PLC, es necesario establecer un grupo de variables, esto se puede hacer en el Tagname Dictionary en menú *Special*, aparece una ventana como la que se muestra en la Figura 3.9, el grupo se ingresa en el botón que dice *Group*, para el caso del sistema de potabilización el nombre del grupo es "CDA". Una configuración típica se muestra en la Figura 3.9 donde es importante destacar que el *item* es la dirección de la variable en el PLC.

Tagname Dictionary

Main
 Details
 Alarms
 Details & Alarms
 Members

Tagname:
 I/O Discrete

CDA
 Read only
 Read Write

Comment:

Log Data
 Log Events
 Retentive Value

Initial Value: On Off

Input Conversion: Direct Reverse

On Msg:

Off Msg:

CDA

Item:

Use Tagname as Item Name

Alarm State: On Off None

Priority:

Figura 3.9 Ejemplo de configuración en In Touch para una variable del PLC en el sistema de potabilización

CAPITULO 4: TABLAS DE VARIABLES

4.1 Variables externas del PLC

En las siguientes tablas se muestran todas variables provenientes del campo o variables externas, que llegan a los módulos del PLC.

Tabla 4.1 Variables de entradas discretas en PLC

Num	Etiqueta	Terminales		Dirección PLC	Descripción	Símbolo
		+	-			
1	S1	283	85	I:1/0	Manual Bombas de agua de servicio	MANUAL_BAS
2	S1	283	86	I:1/1	Automático Bombas de agua de servicio	AUTO_BAS
3	S2	283	87	I:1/2	Manual Bombas de agua cruda	MANUAL_BAC
4	S2	283	88	I:1/3	Automático Bombas de agua cruda	AUTO_BAC
5	S3	283	89	I:1/4	Manual Filtro de lecho múltiple	MANUAL_FLM
6	S3	283	90	I:1/5	Automático Filtro de lecho múltiple	AUTO_FLM
7	S4	283	91	I:1/6	Bomba Agua de servicio 2	SELEC_BAS_2
8	S4	283	92	I:1/7	Bomba Agua de servicio 1	SELEC_BAS_1
9	S5	284	93	I:1/8	Bomba Agua cruda 2	SELEC_BAC_2
10	S5	284	94	I:1/9	Bomba 1 Agua cruda	SELEC_BAC_1
11	B1	284	95	I:1/10	Arranque/Pare Retrolavado	ON_OFF_RETRO
12	B2	284	96	I:1/11	Arranque/Pare Bombas de agua de servicio	ON_OFF_BAS
13	B3	284	97	I:1/12	Arranque/Pare Bombas de agua cruda	ON_OFF_BAC
14	B4	284	98	I:1/13	Prueba de Luces Panel 1	PRUEBA_LUCES_1
15	PE1	284	99	I:1/14	Parada de emergencia Bombas de agua de servicio	PE_BAS
16	PE2	284	100	I:1/15	Parada de emergencia Bombas de agua cruda	PE_BAC
17	S6	285	101	I:2/0	Manual Válvula Neumática	MANUAL_VN

18	S6	285	102	I:2/1	Automático Válvula Neumática	AUTO_VN
19	S7	285	103	I:2/2	Manual Bomba de dosificación Carbonato de Na	MANUAL_BDC
20	S7	285	104	I:2/3	Automático Bomba de dosificación Carbonato de Na	AUTO_BDC
21	S8	285	105	I:2/4	Manual Bomba de dosificación Hipoclorito de Ca	MANUAL_BDH
22	S8	285	106	I:2/5	Automático Bomba de dosificación Hipoclorito de Ca	AUTO_BDH
23	S9	285	107	I:2/6	Manual Bomba de dosificación Sulfato de Al	MANUAL_BDS
24	S9	285	108	I:2/7	Automático Bomba de dosificación Sulfato de Al	AUTO_BDS
25	S10	286	109	I:2/8	Bomba 2 de dosificación Carbonato de Na	SELEC_BDC_2
26	S10	286	110	I:2/9	Bomba 1 de dosificación Carbonato de Na	SELEC_BDC_1
27	S11	286	111	I:2/10	Bomba 2 de dosificación Hipoclorito de Ca	SELEC_BDH_2
28	S11	286	112	I:2/11	Bomba 1 de dosificación Hipoclorito de Ca	SELEC_BDH_1
29	S12	286	113	I:2/12	Bomba 2 de dosificación Sulfato de Al	SELEC_BDS_2
30	S12	286	114	I:2/13	Bomba 1 de dosificación Sulfato de Al	SELEC_BDS_1
31	S13	286	115	I:2/14	ON Agitador Carbonato Na	ON_AGITA_C
32	S13	286	116	I:2/15	OFF Agitador Carbonato Na	OFF_AGITA_C
33	S14	287	117	I:3/0	ON Agitador Hipoclorito de Ca	ON_AGITA_H
34	S14	287	118	I:3/1	OFF Agitador Hipoclorito de Ca	OFF_AGITA_H
35	S15	287	119	I:3/2	ON Agitador Sulfato de Al	ON_AGITA_S
36	S15	287	120	I:3/3	OFF Agitador Sulfato de Al	OFF_AGITA_S
37	B5	287	121	I:3/4	Abierto/Cerrado Válvula Neumática (Modo manual del panel)	ON_OFF_VN
38	B6	287	122	I:3/5	Arranque/Pare Bomba de dosificación Carbonato de Na	ON_OFF_BDC

39	B7	287	123	I:3/6	Arranque/Pare Bomba de dosificación Hipoclorito de Ca	ON_OFF_BDH
40	B8	287	124	I:3/7	Arranque/Pare Bomba de dosificación Sulfato de Al	ON_OFF_BDS
41	B9	288	125	I:3/8	Prueba de Luces Panel 2	PRUEBA_LUCES_2
42	PE3	288	126	I:3/9	Parada de emergencia Bombas de dosificación	PE_BD
43	K39	288	127	I:3/10	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Sulfato de Al	BAJO_NIVEL_TDS
44	K40	288	128	I:3/11	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Hipoclorito de Ca	BAJO_NIVEL_TDH
45	K41	288	129	I:3/12	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Carbonato de Na	BAJO_NIVEL_TDC
48		288	132	I:3/15	Disparo térmico B. Agua Servicio 1	DISP_TERM_BAS_1
49		289	133	I:4/0	Disparo térmico B. Agua Servicio 2	DISP_TERM_BAS_2
50		289	134	I:4/1	Disparo térmico B. Agua Cruda 1	DISP_TERM_BAC_1
51		289	135	I:4/2	Disparo térmico B. Agua Cruda 2	DISP_TERM_BAC_2
52		289	136	I:4/3	Disparo térmico B. Agua Retrolavado	DISP_TERM_BRETRO
53	K33	289	137	I:4/4	Disparo térmico B. Dosif. 1 Sulfato	DISP_TERM_BDS_1
54	K34	289	138	I:4/5	Disparo térmico B. Dosif. 2 Sulfato	DISP_TERM_BDS_2
55	K35	289	139	I:4/6	Disparo térmico B. Dosif. 1 Hipoclorito	DISP_TERM_BDH_1
56	K36	289	140	I:4/7	Disparo térmico B. Dosif. 2 Hipoclorito	DISP_TERM_BDH_2
57	K37	290	141	I:4/8	Disparo térmico B. Dosif. 1 Carbonato	DISP_TERM_BDC_1
58	K38	290	142	I:4/9	Disparo térmico B. Dosif. 2 Carbonato	DISP_TERM_BDC_2
59		290	143	I:4/10	Estado del contactor de las bombas de servicio 1	Est_Cont_BAS_1
60		290	144	I:4/11	Estado del contactor de las bombas de servicio 2	Est_Cont_BAS_2
61		290	145	I:4/12	Estado del contactor de las bombas de A. Cruda 1	Est_Cont_BAC_1
62		290	146	I:4/13	Estado del contactor de las bombas de A. Cruda 2	Est_Cont_BAC_2
63		290	147	I:4/14	Estado del contactor de las bomba de retrolavado	Est_Cont_BRETRO_1

Tabla 4.2 Variables de salida discretas en PLC

Num	Etiqueta	Terminales		Dirección PLC	Descripción	Símbolo
		+	-			
1	L1	69	4	O:9/0	Bajo Nivel Tanque de Agua de Servicio	LUZ_BAJO_NIVEL_TAS
2	L2	70	4	O:9/1	Alto Nivel Tanque de Agua de Servicio	LUZ_ALTO_NIVEL_TAS
3	L3	71	4	O:9/2	Bajo Nivel Tanque de Agua Cruda	LUZ_BAJO_NIVEL_TAC
4	L4	72	4	O:9/3	Alto Nivel Tanque de Agua Cruda	LUZ_ALTO_NIVEL_TAC
5	L5	73	4	O:9/4	Baja Presión tanque Hidroneumático	LUZ_BAJA_PRESION_TH
6	L6	74	4	O:9/5	Bajo Nivel tanque Hidroneumático	LUZ_BAJO_NIVEL_TH
7	L7	75	4	O:9/6	Operando Bombas Agua de Servicio	LUZ_OPERANDO_BAS
8	L8	76	4	O:9/7	Operando Bombas Agua Cruda	LUZ_OPERANDO_BAC
9	L9	77	4	O:9/8	Retrolavado Filtro de lecho múltiple	LUZ_RETRO_FLM
10	L10	78	4	O:9/9	Fallo Bombas Agua de Servicio	LUZ_FALLO_BAS
11	L11	79	4	O:9/10	Fallo Bombas Agua Cruda	LUZ_FALLO_BAC
12	L12	80	4	O:9/11	Fallo Filtro de lecho múltiple	LUZ_FALLO_FLM
13	L13	277	4	O:8/10	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Carbonato de Na	LUZ_BAJO_NIVEL_TDC
14	L14	278	4	O:8/11	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Hipoclorito de Ca	LUZ_BAJO_NIVEL_TDH
15	L15	279	4	O:8/12	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Sulfato de Al	LUZ_BAJO_NIVEL_TDS
16	L16	280	4	O:8/13	Operando Bombas Dosificadora de Carbonato de Na	LUZ_OPERANDO_BDC
17	L17	281	4	O:8/14	Operando Bombas Dosificadora de Hipoclorito de Ca	LUZ_OPERANDO_BDH
18	L18	282	4	O:8/15	Operando Bombas Dosificadora de Sulfato de Al	LUZ_OPERANDO_BDS
19	L19	81	4	O:9/12	Fallo Bombas Dosificadora de Carbonato de Na	LUZ_FALLO_BDC
20	L20	82	4	O:9/13	Fallo Bombas Dosificadora de Hipoclorito de Ca	LUZ_FALLO_BDH
21	L21	83	4	O:9/14	Fallo Bombas Dosificadora de Sulfato de Al	LUZ_FALLO_BDS

22	L22	84	4	O:9/15	Fallo Válvula Neumática	LUZ_FALLO_VN
	Relé				Señales de activación	
23	K1	5	6	O:7/0	Bomba Agua Cruda 1	ACTIVA_BAC_1
24	K2	7	8	O:7/1	Bomba Agua Cruda 2	ACTIVA_BAC_2
25	K3	9	10	O:7/2	Bomba Agua de Servicio 1	ACTIVA_BAS_1
26	K4	11	12	O:7/3	Bomba Agua de Servicio 2	ACTIVA_BAS_2
27	K5	13	14	O:7/4	Bomba de Retrolavado	ACTIVA_BRETRO
28	K6	15	16	O:7/5	Agitador Carbonato	ACTIVA_AGITA_S
29	K7	17	18	O:7/6	Agitador Hipoclorito	ACTIVA_AGITA_H
30	K8	19	20	O:7/7	Agitador Sulfato	ACTIVA_AGITA_C
31	K9	21	22	O:7/8	Activación válvula solenoide 1	ACTIVA_VALVULA_1_FLM
32	K10	23	24	O:7/9	Activación válvula solenoide 2	ACTIVA_VALVULA_2_FLM
33	K11	25	26	O:7/10	Activación válvula solenoide 3	ACTIVA_VALVULA_3_FLM
34	K12	27	28	O:7/11	Activación válvula solenoide 4	ACTIVA_VALVULA_4_FLM
35	K13	29	30	O:7/12	Electro válvula de drenaje tanque hidroneumático	VALV_DRENAJE_TH
36	K14	31	32	O:7/13	Activa la bomba 1 de dosificación de sulfato de aluminio	ACTIVA_BDS_1
37	K15	33	34	O:7/14	Activa la bomba 2 de dosificación de sulfato de aluminio	ACTIVA_BDS_2
38	K16	35	36	O:7/15	Activa la bomba 1 de dosificación de hipoclorito de calcio	ACTIVA_BDH_1
39	K17	37	38	O:8/0	Activa la bomba 2 de dosificación de hipoclorito de calcio	ACTIVA_BDH_2
40	K18	39	40	O:8/1	Activa la bomba 1 de dosificación de carbonato de sodio	ACTIVA_BDC_1
41	K19	41	42	O:8/2	Activa la bomba 2 de dosificación de carbonato de sodio	ACTIVA_BDC_2
42	K20	43	44	O:8/3	Alarma general al cuarto de control	ALARMA_GENERAL
43	K21	45	46	O:8/4	Alarma general asia el laboratorio de química	ALARM_LAB_QUIM
49		276	4	O:8/9	Válvula controladora de presión en el tanque hidroneumático	VALV_CRTL_PRES

Tabla 4.3 Variables de entradas analógicas en PLC

Num	Terminales		Dirección PLC	Descripción	Símbolo
	+	-			
1	149	150	I:15.0	Salida Controlador de pH	PH
2	151	152	I:15.1	Salida del Controlador de Flujo	FLUJO
3	153	154	I:15.2	Nivel Tanque de agua cruda	NIVEL_TAC
4	155	156	I:15.3	Nivel Tanque de agua potable	NIVEL_TAP
5	157	158	I:15.4	Salida Válvula Neumática	INDICA_POS_VN
6	159	160	I:15.5	Sensor de presión (tanque hidroneumático)	PRESION_TH
7	161	162	I:15.6	Sensor de nivel por presión diferencial (tanque hidroneumático)	NIVEL_TH

Tabla 4.4 Variables de salidas analógicas en PLC

Num	Terminales		Dirección PLC	Descripción	Símbolo
	+	-			
1	181	182	O:17.0	Entrada Válvula Neumática	POSICIONA_VN
2	183	184	O:17.1	Bomba 1 de dosificación Sulfato de Al	4_20_BDS1
3	197	198	O:19.0	Bomba 2 de dosificación Sulfato de Al	4_20_BDS2
4	185	186	O:17.2	Bomba 1 de dosificación Hipoclorito de Ca	4_20_BDH1
5	199	200	O:19.1	Bomba 2 de dosificación Hipoclorito de Ca	4_20_BDH2
6	187	188	O:17.3	Bomba 1 de dosificación Carbonato de Na	4_20_BDC1
7	201	202	O:19.2	Bomba 2 de dosificación Carbonato de Na	4_20_BDC2
8	189	190	O:18.0	Envía señal 4-20 del nivel del tanque de agua cruda a la sala de control	CRTL_NIVEL_TAC
9	191	192	O:18.1	Envía señal 4-20 del nivel del tanque de agua potable a la sala de control	CRTL_NIVEL_TAP
10	203	204	O:19.3	Señal 4-20 hacia el indicador de posición del panel local	INDICA_POS_VN_PL

4.2 Variables de Wonderware

Las siguientes tablas contienen información de las variables utilizadas en la aplicación In Touch de Wonderware.

Tabla 4.5 Variables de entradas y salidas discretas en In Touch

Simbolo	Descripción	item
CDA_MANUAL_BAS	Manual Bombas de agua de servicio	I:1/0
CDA_AUTO_BAS	Automático Bombas de agua de servicio	I:1/1
CDA_MANUAL_BAC	Manual Bombas de agua cruda	I:1/2
CDA_AUTO_BAC	Automático Bombas de agua cruda	I:1/3
CDA_MANUAL_FLM	Manual Filtro de lecho múltiple	I:1/4
CDA_AUTO_FLM	Automático Filtro de lecho múltiple	I:1/5
CDA_SELEC_BAS_2	Bomba Agua de servicio 2	I:1/6
CDA_SELEC_BAS_1	Bomba Agua de servicio 1	I:1/7
CDA_SELEC_BAC_2	Bomba Agua cruda 2	I:1/8
CDA_SELEC_BAC_1	Bomba Agua cruda 1	I:1/9
CDA_PE_BAS	Parada de emergencia Bombas de agua de servicio	I:1/14
CDA_PE_BAC	Parada de emergencia Bombas de agua cruda	I:1/15
CDA_MANUAL_VN	Manual Válvula Neumática	I:2/0
CDA_AUTO_VN	Automático Válvula Neumática	I:2/1
CDA_MANUAL_BDC	Manual Bomba de dosificación Carbonato de Na	I:2/2
CDA_AUTO_BDC	Automático Bomba de dosificación Carbonato de Na	I:2/3
CDA_MANUAL_BDH	Manual Bomba de dosificación Hipoclorito de Ca	I:2/4
CDA_AUTO_BDH	Automático Bomba de dosificación Hipoclorito de Ca	I:2/5
CDA_MANUAL_BDS	Manual Bomba de dosificación Sulfato de Al	I:2/6
CDA_AUTO_BDS	Automático Bomba de dosificación Sulfato de Al	I:2/7
CDA_SELEC_BDC_2	Bomba 2 de dosificación Carbonato de Na	I:2/8
CDA_SELEC_BDC_1	Bomba 1 de dosificación Carbonato de Na	I:2/9
CDA_SELEC_BDH_2	Bomba 2 de dosificación Hipoclorito de Ca	I:2/10
CDA_SELEC_BDH_1	Bomba 1 de dosificación Hipoclorito de Ca	I:2/11
CDA_SELEC_BDS_2	Bomba 2 de dosificación Sulfato de Al	I:2/12
CDA_SELEC_BDS_1	Bomba 1 de dosificación Sulfato de Al	I:2/13
CDA_PE_BD	Parada de emergencia Bombas de dosificación	I:3/9
CDA_BAJO_NIVEL_TDC	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Carbonato de Na	I:3/12
CDA_BAJO_NIVEL_TDH	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Hipoclorito de Ca	I:3/11
CDA_BAJO_NIVEL_TDS	Bajo Nivel Tanque Dosisf. Sulfato de Al	I:3/10

CDA_FALLO_OP_TNTAC	Fallo circuito abierto transm tanque agua cruda	B3:5/15
CDA_FALLO_OP_PH	Fallo circuito abierto medidor ph	B3:5/13
CDA_DISP_TERM_BAS_1	Disparo térmico B. Agua Servicio 1	I:3/15
CDA_DISP_TERM_BAS_2	Disparo térmico B. Agua Servicio 2	I:4/0
CDA_DISP_TERM_BAC_1	Disparo térmico B. Agua Cruda 1	I:4/1
CDA_DISP_TERM_BAC_2	Disparo térmico B. Agua Cruda 2	I:4/2
CDA_DISP_TERM_BRETRO	Disparo térmico B. Agua Retrolavado	I:4/3
CDA_DISP_TERM_BDC_1	Disparo térmico B. Dosif. 1 Carbonato	I:4/8
CDA_DISP_TERM_BDC_2	Disparo térmico B. Dosif. 2 Carbonato	I:4/9
CDA_DISP_TERM_BDH_1	Disparo térmico B. Dosif. 1 Hipoclorito	I:4/6
CDA_DISP_TERM_BDH_2	Disparo térmico B. Dosif. 2 Hipoclorito	I:4/7
CDA_DISP_TERM_BDS_1	Disparo térmico B. Dosif. 1 Sulfato	I:4/4
CDA_DISP_TERM_BDS_2	Disparo térmico B. Dosif. 2 Sulfato	I:4/5
CDA_URE_TNTAC	Sobre Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Agua Cruda	I:15/173
CDA_URE_FLUJO	Sobre Rango 4-20 Medidor de Flujo	I:15/157
CDA_URE_TNTAP	Sobre Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Agua Potable	I:15/189
CDA_URE_TNTAC	Sub Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Agua Cruda	I:15/174
CDA_URE_PH	Sub Rango 4-20 Medidor de pH	I:15/142
CDA_ACTIVA_BAC_1	Bomba Agua Cruda 1	O:7/0
CDA_ACTIVA_BAC_2	Bomba Agua Cruda 2	O:7/1
CDA_ACTIVA_BAS_1	Bomba Agua de Servicio 1	O:7/2
CDA_ACTIVA_BAS_2	Bomba Agua de Servicio 2	O:7/3
CDA_ACTIVA_BRETRO	Bomba de Retrolavado	O:7/4
CDA_ACTIVA_AGITA_C	Agitador Carbonato	O:7/7
CDA_ACTIVA_AGITA_H	Agitador Hipoclorito	O:7/6
CDA_ACTIVA_AGITA_S	Agitador Sulfato	O:7/5
CDA_URE_PH	Sobre Rango 4-20 Medidor de pH	I:15/141
CDA_FALLO_OP_TNTH	Circuito abierto transm Nivel tanq hidroneumatico	B3:6/5
CDA_FALLO_OP_PTH	Circuito abierto transm Presion tanq hidroneumatic	B3:6/4
CDA_FALLO_OP_VN	Circuito abierto transm Valv Neumatica	B3:6/3
CDA_VALV_DREN_TH	Electro válvula de drenaje tanque hidroneumático	O:7/12
CDA_ACTIVA_BDC_1	Activa bomba 1 dosif. carbonato de sodio	O:8/1
CDA_ACTIVA_BDC_2	Activa bomba 2 dosif. carbonato de sodio	O:8/2
CDA_ACTIVA_BDH_1	Activa bomba 1 dosif. hipoclorito de calcio	O:7/15
CDA_ACTIVA_BDH_2	Activa bomba 2 de dosif. hipoclorito de calcio	O:8/0
CDA_ACTIVA_BDS_1	Activa bomba 1 dosif. sulfato de aluminio	O:7/13
CDA_ACTIVA_BDS_2	Activa bomba 2 dosif. sulfato de aluminio	O:7/14
CDA_BIT_PROS_RETRO	Proceso de retrolavado	B3:1/6
CDA_INDICA_VACIO_TAC	Nivel del tanque de agua cruda mínimo	B3:2/5
CDA_INDICA_VACIO_TH	Nivel del tanque hidroneumático mínimo	B3:4/8

CDA_INDICA_VACIO_TAP	Nivel del tanque de agua potable mínimo	B3:4/9
CDA_FALLO_OP_FLUJO	Fallo circuito abierto medidor flujo	B3:5/14
CDA_INDICA_FC_BAS_1	Fallo en contactor de bomba de agua de servicio 1	B3:4/11
CDA_INDICA_FC_BAC_1	Fallo en contactor de bomba de agua cruda 1	B3:4/12
CDA_INDICA_FC_FLM	fallo en contactor de bomba de retrolavado 1	B3:4/13
CDA_INDICA_FC_BDC_1	Fallo en bomba dosif carbonato 1	B3:4/14
CDA_INDICA_FC_BDH_1	Fallo en bomba dosif hipoclorito 1	B3:4/15
CDA_INDICA_FC_BDS_1	Fallo en bomba dosif sulfato 1	B3:5/0
CDA_INDICA_FALLO_VN	Fallo en válvula neumática	B3:5/1
CDA_BAJO_CARBONATO	baja concentración de carbonato de sodio	B3:5/4
CDA_ALTO_CARBONATO	alta concentración de carbonato de sodio	B3:5/5
CDA_INDICA_FC_BAS_2	Fallo en contactor de bomba de agua de servicio 2	B3:5/6
CDA_INDICA_FC_BAC_2	Fallo en contactor de la bomba de agua cruda 2	B3:5/7
CDA_INDICA_FC_BDC_2	Fallo en bomba dosif carbonato 2	B3:5/8
CDA_INDICA_FC_BDH_2	Fallo en bomba dosif hipoclorito 2	B3:5/9
CDA_INDICA_FC_BDS_2	Fallo en bomba dosif sulfato 2	B3:5/10
CDA_INDICA_AB_VN	válvula neumatica abierta un 100%	B3:5/11
CDA_INDICA_CD_VN	válvula neumatica cerrada	B3:5/12
CDA_BIT_PROS_NTAC	Inicio de proceso de dosificacion	B3:1/8
CDA_FALLO_OP_TNTAP	Circuito abierto transm tanq agua potable	B3:6/1
CDA_T0_RETRO	Eta de retrolavado	T4:0/TT
CDA_T1_PAUSA	Eta de pausa	T4:1/TT
CDA_T2_ENJUAGUE	Eta de enjuague	T4:2/TT
CDA_VALV_CRTL_PRES	Valvula controla presion tanque hidroneumatico	O:8/9
CDA_INDICA_SOBRE_PRES_TH	Presion mayor a 5 bar	B3:7/4
CDA_SUB_MIN_TAP	Nivel TAP por debajo de lo normal	B3:7/13
CDA_INDICA_SN_TAP	Nivel TAP por encima de lo normal	B3:8/1
CDA_INDICA_SUB_MIN_TAC	Nivel TAC por debajo de lo normal	B3:8/2
CDA_INDICA_SN_TAC	Nivel TAC por encima de lo normal	B3:8/3
CDA_INDICA_SN_TH	Nivel TH por encima de lo normal	B3:8/5
CDA_INDICA_SUB_PRES_TH	Baja presion en tanque hidroneumatico	B3:8/4
CDA_URE_TNTAP	Sub Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Agua Potable	I:15/190
CDA_URE_PTH	Sobre Rango 4-20 Transm Presion Tanq Hidroneumatic	I:15/221
CDA_URE_PTH	Sub Rango 4-20 Transm Presion Tanq Hidroneumatic	I:15/222
CDA_URE_TNTH	Sobre Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Hidroneumatico	I:15/237
CDA_URE_TNTH	Sub Rango 4-20 Transm Nivel Tanq Hidroneumatico	I:15/238
CDA_FALLO_VN	Sobre o sub rango 4-20 válvula neumática	B3:8/12

Tabla 4.6 Variables de tipo entero

Simbolo	Descripción	item
CDA_PH	Salida Controlador de pH	I:15.0
CDA_FLUJO	Salida del Controlador de Flujo	I:15.1
CDA_NIVEL_TAC	Nivel Tanque de agua cruda	I:15.2
CDA_NIVEL_TAS	Nivel Tanque de agua de servicio	I:15.3
CDA_INDICA_POS_VN	Salida realimentacion Válvula Neumática	I:15.4
CDA_PRESION_TH	Sensor de presión (tanque hidroneumático)	I:15.5
CDA_NIVEL_TH	Sensor de nivel P diferencial (tanque hidroneumático)	I:15.6
CDA_POSICIONA_VN	Entrada Válvula Neumática	O:17.0
CDA_4_20_BDC1	Bomba 1 de dosificación Carbonato de Na	O:17.3
CDA_4_20_BDC2	Bomba 2 de dosificación Carbonato de Na	O:19.2
CDA_4_20_BDH1	Bomba 1 de dosificación Hipoclorito de Ca	O:17.2
CDA_4_20_BDH2	Bomba 2 de dosificación Hipoclorito de Ca	O:19.1
CDA_4_20_BDS1	Bomba 1 de dosificación Sulfato de Al	O:17.1
CDA_4_20_BDS2	Bomba 2 de dosificación Sulfato de Al	O:19.0
CDA_POSICION_VN	Posición de la válvula neumática de 0 a 100%	N7:0

Tabla 4.7 Variables de tipo real en In Touch

Simbolo	Descripción	item
CDA_NIVEL_TAC_CM	Nivel del tanque de agua cruda en centímetros	F8:0
CDA_VOLUMEN_TAC	volumen del tanque de agua cruda en metros cúbico	F8:1
CDA_NIVEL_TAP_CM	Nivel del tanque de agua potable en centímetros	F8:3
CDA_VOLUMEN_TAP	volumen del tanque de agua potable en metros cúbico	F8:4
CDA_NIVEL_TH_CM	Nivel del tanque hidroneumático en centímetros	F8:7
CDA_PRES_TH_BAR	Presión TH en Bar	F8:14
CDA_FLUJO_LPM	Flujo en litros por minuto	F8:15
CDA_PH_ESCALADO	Valor de pH escalado	F8:18

CAPITULO 5: CALIBRACIÓN DE DISPOSITIVOS

5.1 Calibración del medidor de flujo

Para ingresar en el menú de calibración del medidor de flujo GF SIGNET 8900, presione el botón de *ENTER* por 2s, esto le permite ingresar en el Directorio de Menús donde debe desplazarse arriba o abajo, como se muestra en la Figura 5.1, hasta encontrar el menú de calibración, una vez en el, presione nuevamente *ENTER* para ingresar en el menú. La contraseña estándar son las teclas “ARRIBA-ARRIBA-ARRIBA-ABAJO”, apretadas en secuencia.

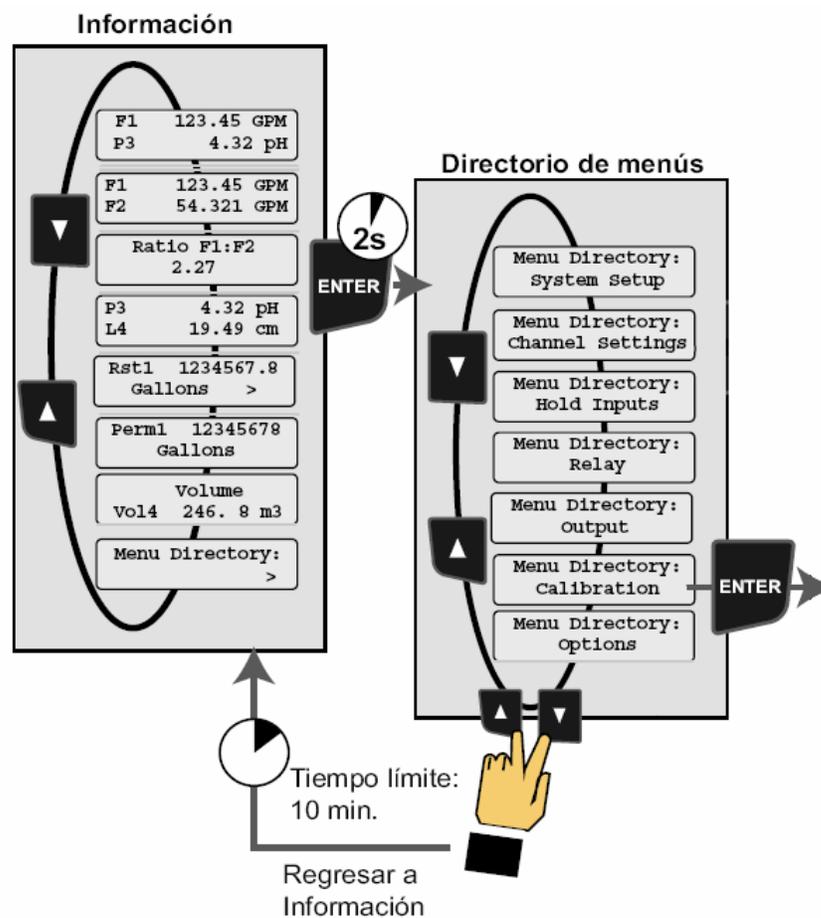


Figura 5.1 Ingreso al menú de calibración para e medidor de flujo

Dentro del menú de calibración siga los siguientes pasos hasta completar la calibración:

- | | | |
|----|---|--|
| a) | F1 Cal Method:
Volume > | Índice: Seleccione el método de calibración basado en la tasa.
Volumétrico: Seleccione el método de calibración volumétrico |
| b) | Volumetric Cal
F1: > | Seleccione una calibración volumétrica. |
| c) | Press <ENTER>
to Start Cal | Apriete <i>ENTER</i> para comenzar el periodo de calibración volumétrica. El 8900 comienza a contar los impulsos del sensor de caudal. |
| d) | Press <ENTER>
to Stop Cal | Apriete <i>ENTER</i> para detener el periodo de calibración volumétrica. El instrumento 8900 deja de contar los impulsos del sensor de caudal. |
| e) | Enter Volume:
0000.0 GPM | Introduzca el volumen conocido de fluido que paso por el sensor durante el periodo de calibración volumétrica. Esto modificara el factor K de caudal existente |
| f) | New K-Factor:
123.456 | Se realizo correctamente la calibración volumétrica. Apriete <i>ENTER</i> para aceptar el nuevo factor K o apriete simultáneamente las teclas <i>ARRIBA-ABAJO</i> para salir sin guardar y regresar a <i>Enter Volume</i> (Introducir volumen) |
| g) | Error: K-Factor
Out Of Range | El factor K calculado es menor de 0,0001 o mayor de 99999. Regresa a Introducir volumen. |
| h) | Error: No Flow
Detected | Indica que el sensor de caudal no esta generando impulsos o que el 8900 no detecta los impulsos. Regresa a <i>Volumetric Cal</i> (Cal. volumétrica). |

5.2 Calibración del medidor de pH

El dispositivo TB84PH posee dos procedimientos de calibración:

- Un punto de calibración (*1PT.CAL, One-Point Calibration*)
- Dos puntos de calibración (*2PT.CAL, Two-Point Calibration*)

El descrito a continuación consiste en el de dos puntos de calibración. Para mayor información diríjase al manual Sección 6, Modo de Calibración, pagina 6-1.

La calibración en dos puntos conduce el nivel de offset y la pendiente del sensor para obtener la respuesta característica del mismo. Esta calibración se realiza antes de la instalación del sensor y durante su vida útil, cuando la respuesta del sensor empieza a descender.

Cuando se realiza la calibración en dos puntos, automáticamente el analizador inicia en modo *HOLD ALL CONDITION*, lo que significa que las salidas permanecen inalterables durante la calibración. Al activarse el modo *HOLD ALL*, el icono HOLD en la parte superior de la pantalla, empieza a parpadear, y permanecerá activo durante toda la calibración.

En el procedimiento para la calibración con dos puntos, que sigue a continuación, utilice como guía la Figura 5.2:

- a) Prepare las soluciones Buffer
- b) Seleccione el 2PT.CAL en el estado de operación para calibración del sensor. Utilice las teclas seleccionadoras.
- c) Remueva el sensor del sistema de tuberías (si es necesario).
- d) Ingrese la temperatura en grados Celsius del Buffer utilizando la tecla “▲” para incrementar el dígito parpadeante y la tecla “▶” para pasar al siguiente dígito. Luego presione *ENTER* para guardar el nuevo valor.
- e) Ingrese *LO VAL* o valor de pH bajo del buffer 1. Luego presione *ENTER* para guardar el nuevo valor.
- f) Coloque el sensor dentro del buffer 1 de valor de pH bajo, y agite la solución con el sensor haciendo suaves movimientos circulares.

g) Una vez que la lectura se estabiliza, confírmelo utilizando la tecla YES o NO cuando la pantalla indica STABL? (estable?).

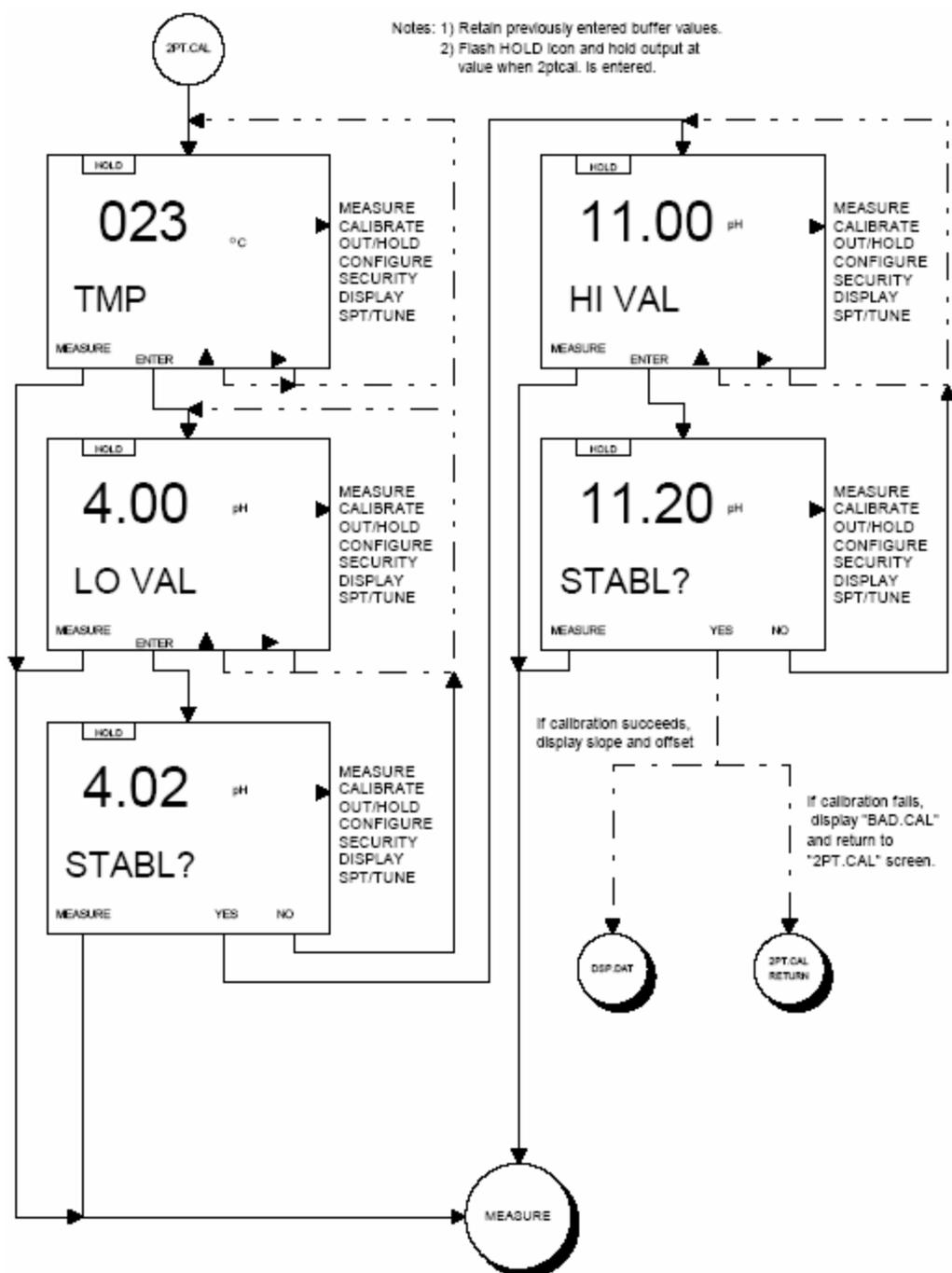


Figura 5.2 Diagrama de flujo para el proceso de calibración de dos puntos

- h) Ingrese HI VAL o valor de pH alto del buffer 2. Luego presione *ENTER* para guardar el nuevo valor.
- i) Remueva el sensor del buffer 1, enjuague el sensor y colóquelo en el buffer 2. Agite la solución con el sensor haciendo suaves movimientos circulares.
- j) Una vez que la lectura se estabiliza, confírmelo utilizando la tecla “YES” o “NO” cuando la pantalla indica STABL? (estable?).

Una calibración no válida despliega el mensaje *BAD.CAL*, haciendo que la calibración no sea aceptada. Por otro lado una calibración válida, despliega en pantalla la eficiencia de la calibración, por medio del valor de la pendiente en porcentaje teórico. Presionando la tecla *NEXT* despliega el valor de *Offset*. En este punto el usuario puede escoger el retornar al estado del proceso de calibración del sensor, presionando la tecla *NEXT*, o al modo de medición presionando la tecla *EXIT To MEASURE*.

Si la condición *HOLD* se encuentra presente, el analizador TB84PH preguntará si la condición debe ser liberada (*released*), para la cual se presiona la tecla *YES* para volver al modo de medición o *NO* para mantener la condición (ver Figura 5.3).

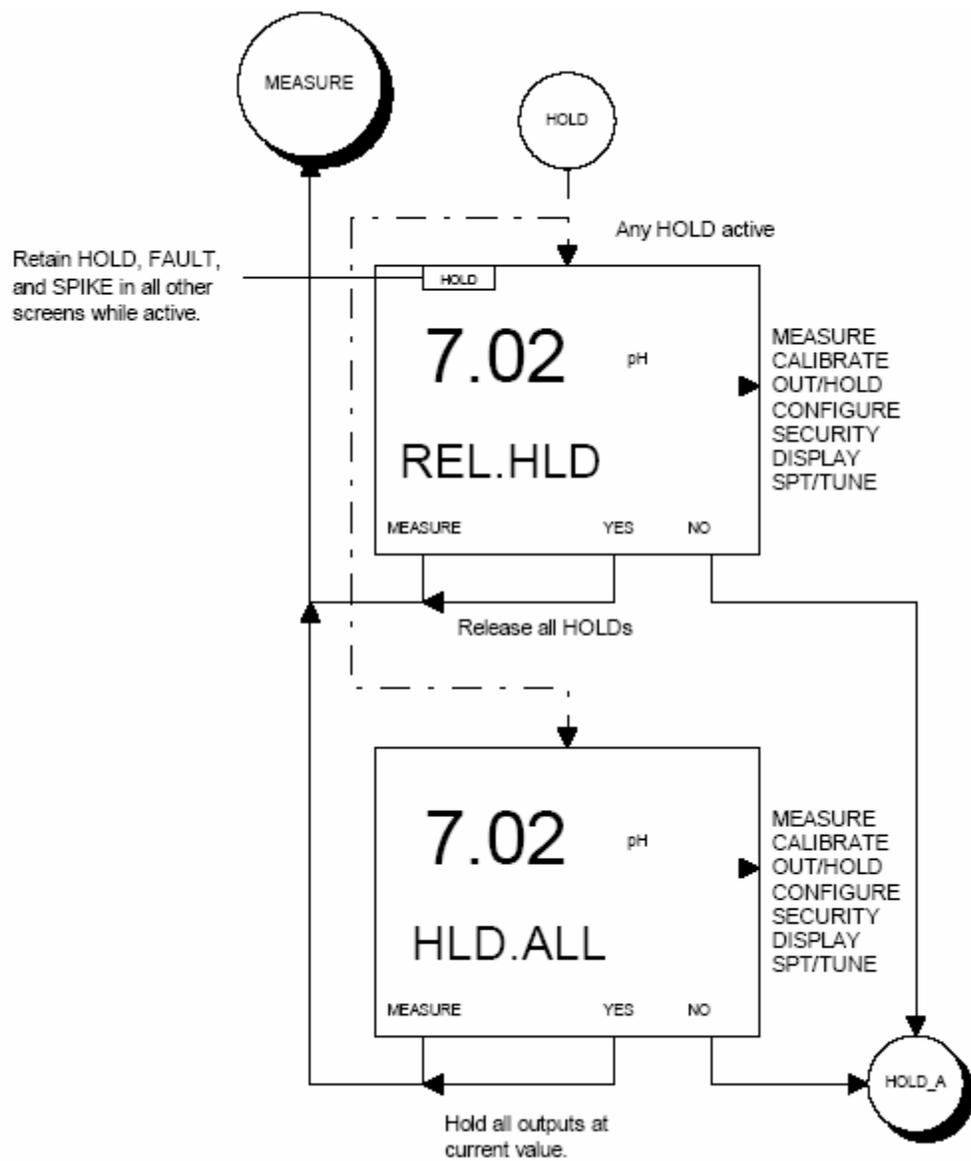


Figura 5.3 Diagrama de flujo para un estado de operación retentivo (*HOLD*)

5.3 Calibración de los transmisores de nivel

Para configurar el transmisor modelo 805 se puede hacer de dos formas:

- Via HART (Highway Addressable Remote Transducer)
- Por medio de la pantalla de cristal líquido del transmisor (LCD)

A continuación se mencionará el modo de calibración por medio del LCD del transmisor.

Antes de empezar deben tenerse los puntos de calibración necesarios, como se muestra en la Figura 5.4, en este caso para el sistema de potabilización, a modo de ejemplo. Lo primero que hay que tomar en cuenta es un punto de referencia, que para este caso es la punta del sensor, a partir de este, se mide la distancia así los puntos de *Nivel 4mA*, *Hi Cal* y *Lo Cal*. Para el *Nivel 20mA*, se mide a partir del *Nivel 4 mA* como se muestra en la Figura 5.4. El valor de *Lo Cal* puede colocarse de la mitad así abajo en el rango entre *Nivel 4mA* y *Nivel 20mA*, y *Hi Cal* de la mitad hacia arriba del mismo rango. Los valores obtenidos son los que se introducen dentro del procedimiento de calibración. Una buena práctica es marcar en el sensor los cuatro puntos de calibración, ya que se requiere variar el nivel del líquido justo en estos durante procedimiento.

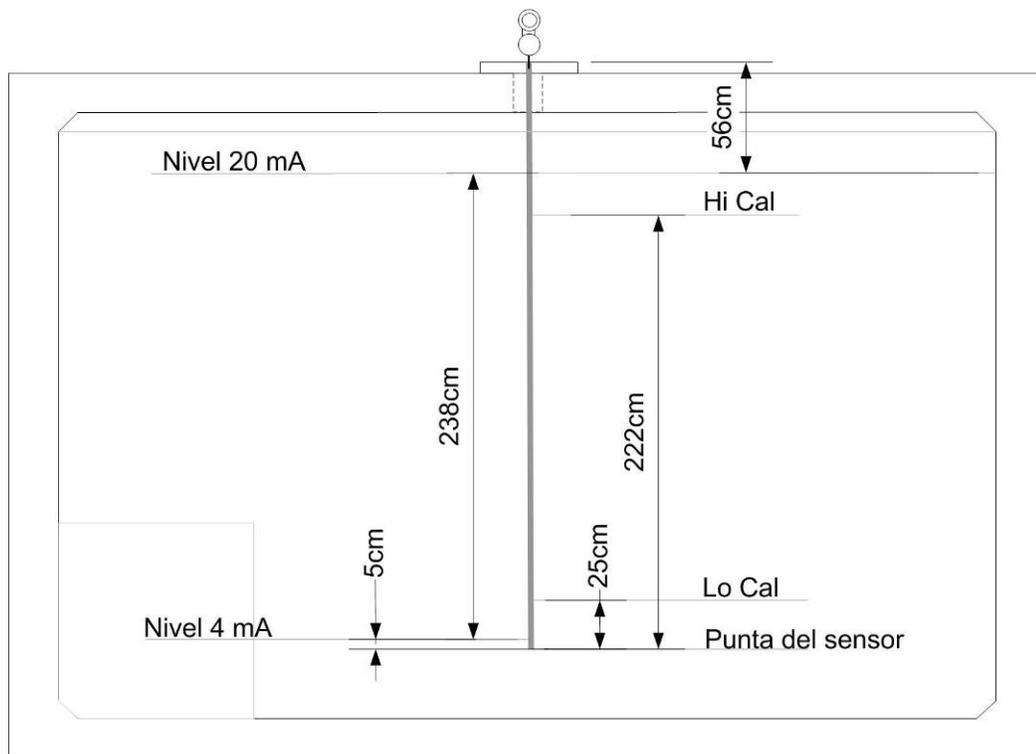


Figura 5.4 Puntos de calibración para el sistema de potabilización

Una vez debidamente conectado el transmisor, ingrese al modo de configuración presionando la tecla *ENTER* “↵”. El clave de acceso de fabrica es “0”. Luego siga el procedimiento que se describe a continuación:

- a)

Units lu

 Seleccione la unidades de medición para la calibración y despliegue en la pantalla (in: pulgadas, cm: centímetros). Modifique presionando *Enter* y variando el valor por medio de las teclas Arriba “↑” y Abajo “↓”. Luego presione *Enter* para salvar. Para desplazarse dentro del menú y pasar al siguiente paso, presione la tecla Abajo “↓”

- b)

Lo Cal xxx.x lu

 Mueva el nivel de liquido en el tanque para la posición de *Lo Cal* e ingrese su valor (Ej. 25cm)

- c)

Lo Cap xxxx pF

 Capacitancia para el punto de calibración baja (Lo Cal)
- d)

Hi Cal xxx.x lu

 Mueva el nivel de liquido en el tanque para la posición de *Hi Cal* e ingrese su valor (Ej. 222cm)
- e)

Hi Cap xxxx pF

 Capacitancia para el punto de calibración alta (Hi Cal)
- f)

Set 4mA xxx.x lu

 Mueva el nivel de liquido en el tanque para la posición de *Nivel 4mA* e ingrese su valor (Ej. 5cm)
- g)

Set 20mA xxx.x lu

 Mueva el nivel de liquido en el tanque para la posición de *Nivel 20mA* e ingrese su valor (Ej. 238cm)

Luego de realizado estos pasos el sensor que listo para su uso. Para mayor información consulte el manual de instalación y operación.

APÉNDICE B INFORMACIÓN ADICIONAL

B.1 Tabla con lista de equipo adquirido antes de iniciado el proyecto de graduación

Tabla B 1 Equipo licitado antes del inicio del proyecto de graduación

Recurso	Nombre y dirección del proveedor
PLC y módulos	GNE, Automatizaciones Industriales de Centroamérica, Curridabat
Interruptores de nivel, resistentes a corrosión	PISESA San José
Agitadores	PISESA
Válvula de compuerta	Fisher Controls SA, San Jose
Válvula neumática	PISESA
Transmisor de nivel	PISESA
Mirilla de nivel con interruptores	PISESA
Sensor y controlador pH	SAMER, San José
Medidor y controlador de flujo	JR Controler, San José
Tablero de control, incluye equipos, accesorios, materiales y mano de obra.	GNE, Curridabat

B.2 Descripción eléctrica de equipos

Dentro de esta sección se hace referencia a los equipos más importantes que intervienen en el proceso de potabilización, en cuanto a capacidad y a características eléctricas.

B.2.1 Bomba de retrolavado

Esta bombea agua potable en la función de retrolavado el cual consiste en invertir el sentido del agua que pasa por el filtro de lecho múltiple para expulsar por la tubería de drenaje la suciedad acumulada en el mismo.

Tabla B 2 Características de operación de la bomba de retrolavado

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Capacidad
Realiza el proceso de retrolavado del filtro	Baldor Industrial Motor	Cat. JMM3613T	208-230V Trifásico 60 Hz Amps. 13.2-12/5	3450 RPM NEMA NOM EFF. 85.5% PF. 93% H.P. 5

B.2.2 Bombas de agua cruda

Son las encargadas de hacer pasar el agua proveniente del tanque de agua cruda por el filtro de lecho múltiple (estado de servicio) y a su vez al tanque de agua potable.

Tabla B 3 Características de operación de las bombas de agua cruda

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Capacidad
Enviar el agua cruda al filtro y al tanque de agua potable. filtro	Baldor Industrial Motor	Cat. JMM3610T	208-230V Trifásico 60 Hz Amps. 8.2-7.8/3.9	3450 RPM NEMA NOM EFF. 81.5% PF. 89% H.P. 3

B.2.3 Bombas de agua de servicio

Estas bombean el agua potable proveniente del tanque del mismo nombre hacia el tanque hidroneumático.

Tabla B 4 Características de operación de las bombas de agua de servicio

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Capacidad
Enviar el agua potable al tanque de presión. filtro	Baldor Industrial Motor	Cat. JMM3709T	208-230V Trifásico 60 Hz Amps. 21-18.8/8.4	3450 RPM NEMA NOM EFF. 84% PF. 90% H.P. 7.5

B.2.4 Filtro de lecho múltiple

Este filtro se encarga retener partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el agua cruda, típicamente los filtros marca CULLIGAN, modelo HD-362 remueven hasta un tamaño de partícula de 10 micrómetros. Y dependiendo de la turbiedad se puede obtener eficiencias de filtración de hasta un 90%.

El filtro de lecho múltiple posee diferentes medios de filtrados que absorben y acumulan suciedad, por esto es necesario someterlo a un proceso de limpieza conocido como retrolavado.

Tabla B 5 Condiciones de operación del filtro de lecho múltiple

Caudal	10 m ³ /h
Flujo de retrolavado	28 m ³ /h
Diámetro	914.4 mm
Altura Cilíndrica	1371.6 mm
Conexiones	50 mm
Presión de diseño	6.91 bar
Temperatura de diseño	50 °C
Peso aproximado	2530lbs

El modo de operación de las válvulas se muestra en la siguientes tabla:

Tabla B 6 Estado de los diafragmas en los diferentes ciclos de acondicionamiento

Puerta	Ciclos		
	SR	BW	CR
1	0	1	0
2	0	1	1
3 y 4	1	0	1
5	1	1	0
6	1	1	1

Nota: 1(puerta abierta); 0(puerta cerrada)

B.2.5 Tanque hidroneumático

Se utiliza para mantener presurizada el agua de servicio y hacer que el agua llegue a todos los rincones de la planta. Este poseía cuatro sensores de nivel y un sensor de presión, estos fueron sustituidos por los siguientes sensores:

- a. **Medidor de presión diferencial:** Este se utiliza para medir el nivel de agua del tanque por medio de la diferencia de presiones.
- b. **Medidor de presión absoluta:** Este se utiliza para medir la presión de aire que se encuentra en el tanque de tal forma que si la presión disminuye o aumenta demasiado despliegue su respectiva señal de alarma.

Tabla B 7 Características de operación de los sensores en el tanque hidroneumático

Descripción	Sensor	Marca	Modelo	Alimentación	Salidas
Dar presión al agua para servicio.	Sensor presión	Yokogawa	EJA310A	Max 42VDC	4-20mA
	Sensor diferencial de presión	Rosemount	1151 Smart	12 a 45VDC	4-20mA

B.2.6 Bombas de dosificación

Este tipo de bomba provee un desplazamiento fijo y constante de volumen por cada revolución que da el motor ya que lo que se mueve a través del pistón de operación es un diafragma que mantiene un volumen dentro de el para ser inyectado o transportado. Este líquido atrapado en el diafragma es presionado por un movimiento recíprocante que posee la bomba y es descargado fuera del diafragma.

Se utilizarán dos tipos de bombas dosificadoras:

- a. **Pulsatron:** modelo LPHGMA-PTC3-XXX con entrada 4-20 mA para el control del flujo.

- b. **LMI Milton Roy:** modelo B711-91s con entrada digital para control del flujo por lo que adicionalmente se requiere de un convertidor analógico digital MP-100 de la misma marca.

Estas bombas operan a un voltaje de 110V y su función principal es inyectar al flujo de agua los productos químicos necesarios en el sistema de tratamiento de agua.

Tabla B 8 Características de operación de las bombas de dosificación

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Entradas	Salidas	Capacidad	Presión
Bombean los tres químicos hacia la entrada de agua cruda	Pulsatron	LPH6MA-PTC3-XXX	120VAC Monofásico	4-20mA	-----	18.9 l/h	100PSI 7 bar
	LMI Milton Roy	B711-91s	120VAC Monofásico	Digital	-----	6.1 l/h	150 PSI 10.3 bar
Convertidor analógico digital (Micropace)	LMI Milton Roy	MP-100	Max 42VDC 100 Ohms	4-20mA	Digital	-----	-----

B.2.7 Interruptores de nivel, resistentes a corrosión

Es interruptores se colocan en los tanques dosificadores, su función es indicar cuando el nivel de alguno de los químicos de dosificación se encuentra vacío.

Tabla B 9 Características interruptores de nivel resistentes a corrosión

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Salida
Se activan con un nivel bajo de los tanques de agua cruda	Milton Roy	26731	120 VAC	120 VAC

B.2.8 Agitadores

Igual que los interruptores de nivel, se colocan en los tanques dosificadores, y se encargan de agitar los químicos para su disolución.

Tabla B 10 Características de agitadores

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación
Agitan la mezcla de los tanques de químicos	Milton Roy	10590	120VAC Monofásico

Observaciones: Eje de 34" de largo de acero inoxidable con propela

B.2.9 Válvula Neumática

Esta se encuentra en la entrada del tanque de agua cruda, justo antes del sistema de dosificación, su función es permitir el paso de agua proveniente del tanque de captación hacia el tanque de agua cruda.

Tabla B 11 Características de la válvula neumática

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Entradas	Salidas	Ent/Sal de agua
Controla la apertura del agua en el tanque de agua cruda	Bray Controls	Serie 40	24VDC	4-20mA	Posición 4-20mA	Acople roscado Diámetro 3"

Observaciones: Presión de agua 200psi, Presión de aire 90lbs, acero inoxidable

B.2.10 Transmisor de nivel

Estos transmisores suministran el nivel de agua del tanque de agua cruda y el de agua potable por medio de una señal 4-20 mA que se conecta directamente al módulo de entrada analógico del PLC.

Tabla B 12 Características del transmisor de nivel

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Capacidad	Salidas
Para medir el nivel de los tanques de agua cruda y de servicio	Magnetrol	805-511A-110	24VDC	275 psi Altura a medir 3 m	4-20mA

B.2.11 Sensor y medidor pH

Este sistema es el encargado de brindarle al PLC el grado de acidez del agua dosificada con sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio, por medio de una señal 4-20 mA en la salida del medidor de pH. El medidor TB84PH es de la marca ABB y tiene una alimentación de 13.5 a 42 VDC, utiliza un sensor TB556 para acople en línea de 3/4 de pulgada NPT. Este medidor posee una pantalla de cristal líquido para la interfase con el usuario.

Tabla B 13 Características del sensor y controlador pH

Descripción	Dispositivo	Marca	Modelo	Alimentación	Salidas
Determina el grado de acidez en la entrada de agua cruda	Controlador	ABB	TB82PH1110112	13.5 a 42 V DC	4-20mA Relé

Observaciones: Sensor rango 0-12 pH

B.2.12 Sensor y medidor de flujo

Se encuentra justo después de la válvula neumática, y se encarga de medir el flujo de agua que ingresa al tanque de agua cruda. Es de suma importancia para la dosificación de sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio.

Tabla B 14 Características del medidor y controlador de flujo

Descripción	Marca	Modelo	Alimentación	Entradas	Salidas
Mide la cantidad de flujo que ingresa al tanque de agua cruda	GF+ Signet	Catálogo: A-05627-65	24VDC	S ³ L	4-20mA Relé
Sensor de flujo	GF+ Signet	Rotor x Catalogo: A-05618-10	S ³ L (conexión patentada por el fabricante)		

B.2.13 Características del PLC

A continuación se describen las características eléctricas más importantes de los módulos del PLC utilizados en el sistema de potabilización así como las características comunes de los PLC SLC 500.

Tabla B 15 Especificaciones comunes de SLC 500

Descripción	Especificación
Temperatura	En funcionamiento: de 0 °C a +60 °C (de +32 °F a +140 °F)
	Almacenamiento: de -40 °C a +85 °C (de -40 °F a +185 °F)
Humedad	de 5 a 95 % sin condensación
Vibraciones	En funcionamiento: de 1.0 G a 5 hasta 2000 Hz
	Sin funcionar: de 2.5 G a 5 hasta 2000 Hz
Choque	En funcionamiento: (todos los módulos salvo contacto de reles) 30.0 G (3 impulsos, 11 ms)
	En funcionamiento: (módulos de contacto de reles 1746-OWx y 1746-IOx combo) 10.0 G (3 impulsos, 11 ms)
	Sin funcionar: 50.0 G (3 impulsos, 11 ms)
Caída libre (prueba de caída)	Portátil, 2.268 kg (5 libras) o menos a 0.762 m (30 pulg.) (seis caídas)
	Portátil, 2.268 kg (5 libras) o mas a 0.1016 m (4 pulg.) (tres caídas en plano)
Inmunidad a ruidos	Norma NEMA ICS 2-230
	Arco eléctrico: 1.5 KV (norma industrial: NEMA ICS 2-230/NEMA ICS 3-304)
	Capacidad para soportar sobre tensiones: 3 KV (norma industrial: Norma IEEE 472- 1974/ANSI C37.90/ 90A-1974)
	Ráfaga de fenómeno transitorio rápido (impulso): 2 KV para fuentes de alimentación 1746, 1 KV para 1746 I/O y líneas de comunicaciones de mas de 10 m (32.84 pies), 5 ns de tiempo de elevación
Compatibilidad	Descarga electrostática (ESD): 15 KV, 100 pF/modelo de

electromagnética	1.5 KW
	Susceptibilidad electromagnética radiada: walkie-talkie de 5 W a 464.5 MHz y 153.05 MHz
Seguridad	Capacidad nominal dieléctrica: 1500 VCA (norma industrial: UL 508, CSA C22.2 N° 142)
	Aislamiento entre circuitos de comunicación: 500 VCC
	Aislamiento entre backplane y E/S: 1500 VCA
	Inflamabilidad e incendio eléctrico: UL94V-0
Certificaciones (cuando el producto o embalaje lleva la marca)	<ul style="list-style-type: none"> • listado en CUL • Clase I, Grupos A, B, C o D, División 2 • acorde con la normativa de la CE establecida por las pertinentes directivas • certificación de CSA • listado en UL

Tabla B 16 Módulo de entradas discretas

Nº de catálogo	Descripción del módulo	Categoría de voltaje	Número de entradas	Puntos por común	Carga de la fuente de alimentación	
					5 VCC	24 VCC
1746-IB16	Drenador de corriente de CC	24 VCC	16	16	85 mA	0 mA

Tabla B 17 Módulo de salidas discretas

Nº de catálogo	Descripción del módulo	Categoría de voltaje	Número de entradas	Puntos por común	Corriente continua por punto a 30°C (máx)	Carga de la fuente de alimentación	
						5 VCC	24 VCC
1746-OW16	Relé de CA/CC	5 a 265 VCA 5 a 125 VCC	16	8	Ver cuadro de capacidades	170 mA	180 mA

Tabla B 18 Cuadro de las capacidades de contacto de las salidas de relé en los módulos discretos

Tipo	Máx. Voltios	Amperios		Amperios continuos	Volta-amperios	
		Apertura	Cierre		Apertura	Cierre
Capacidades nominales para OW16	240 VCA	7.5 A	0.75 A	2.5 A	1800 VA	180 VA
	120 VCA	15.0 A	1.50 A			
	125 VCC	0.22 A		1.0 A	28 VA	
	24 VCC	1.2 A		2.0 A	28 VA	

Tabla B 19 Módulos de entrada analógica

Nº de catálogo	Canales de entrada por módulo	Consumo de corriente del Backplane	
		5 VCC	24 VCC
1746-NI8	8 diferenciales con dirección de voltaje o corriente	200 mA	100 mA

Tabla B 20 Módulos de salida analógica

Nº de catálogo	Canales de entrada por módulo	Consumo de corriente del Backplane	
		5 VCC	24 VCC
1746-NO41	4 salidas de corriente	55 mA	195 mA

B.3 Circuitos de interconexión y control

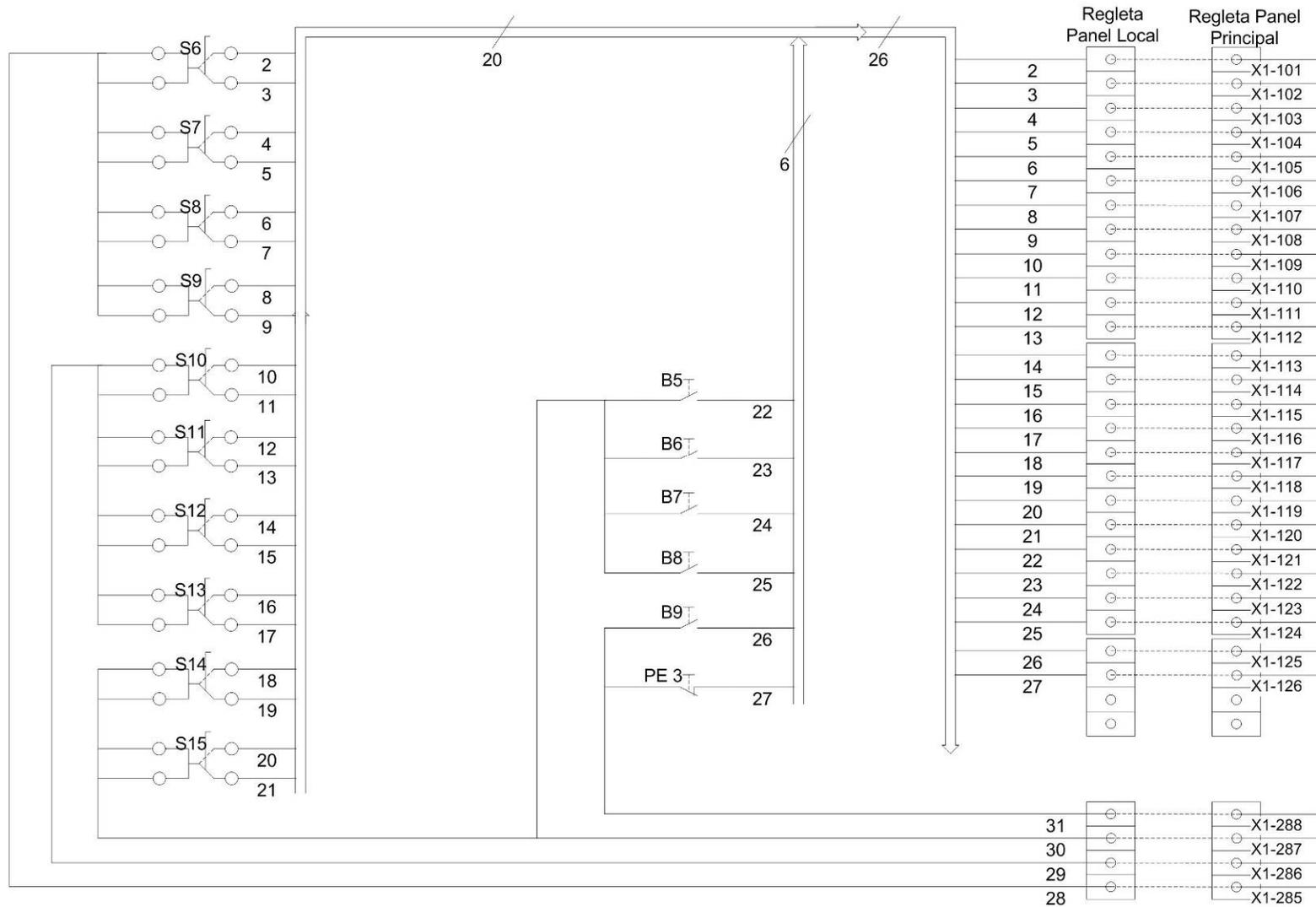


Figura B 1 Señales de salida del panel local asia el panel principal

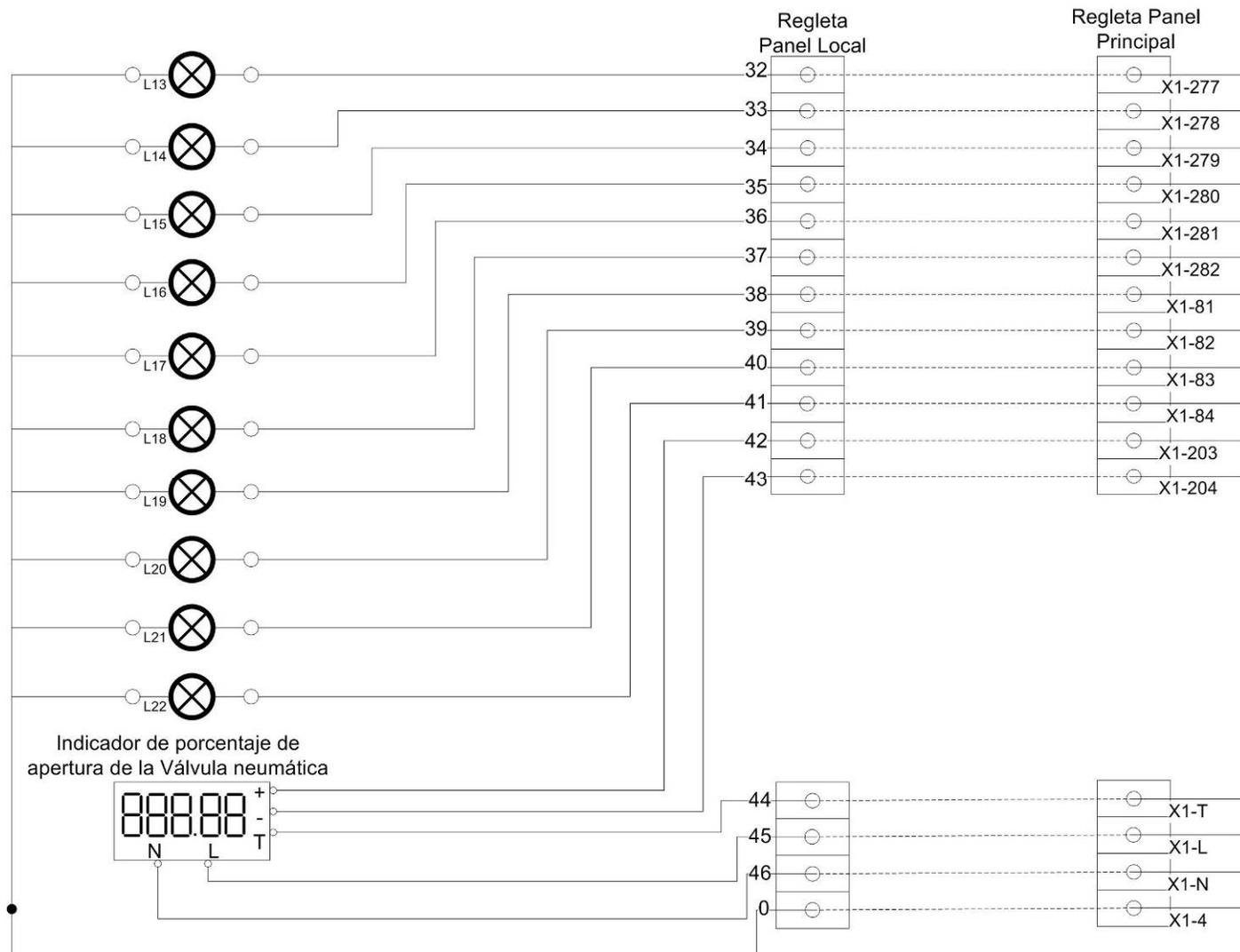


Figura B 2 Señales de entrada al panel local provenientes del panel principal

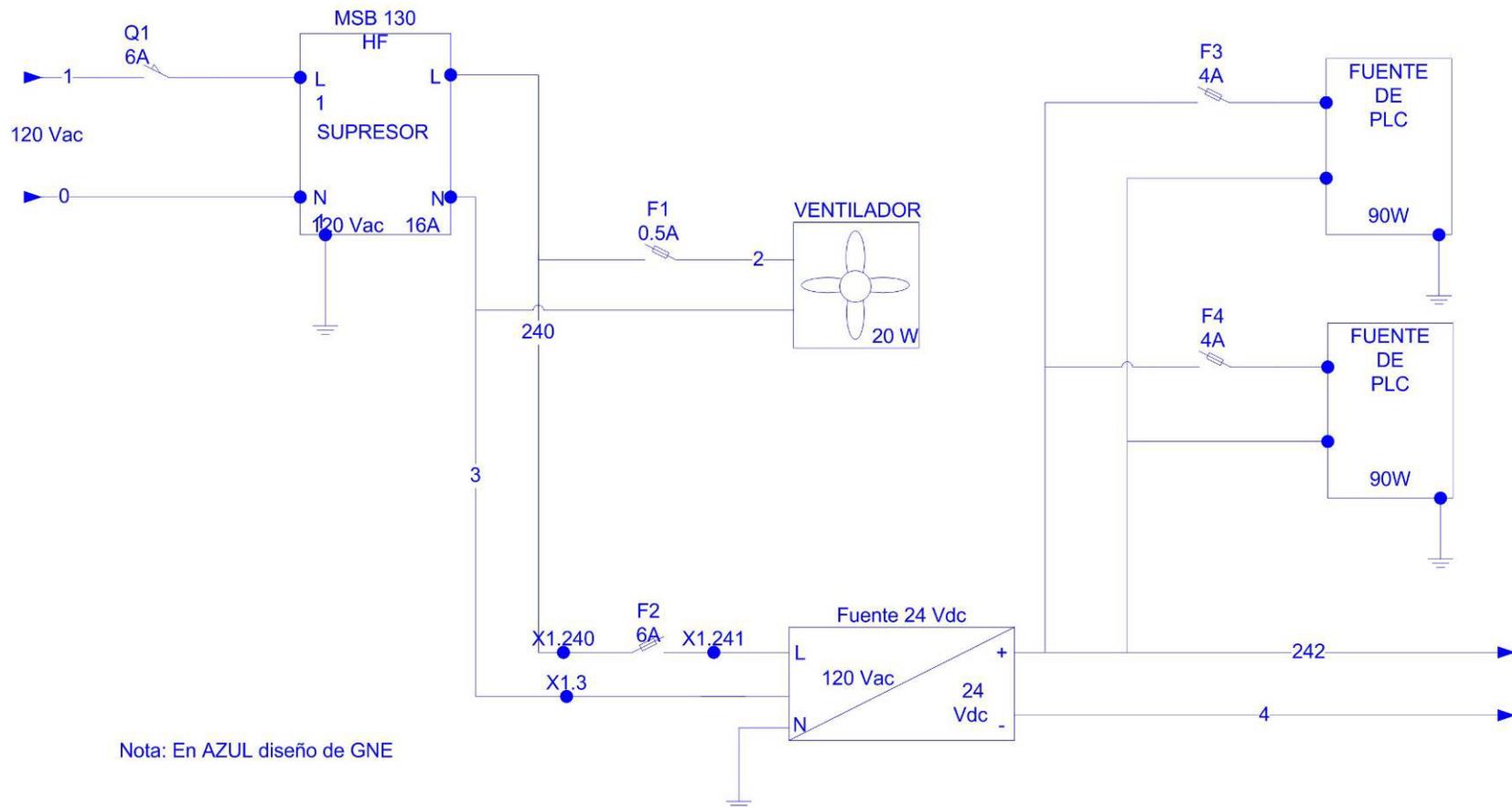


Figura B 3 Circuito de alimentación fuente de 24 voltios

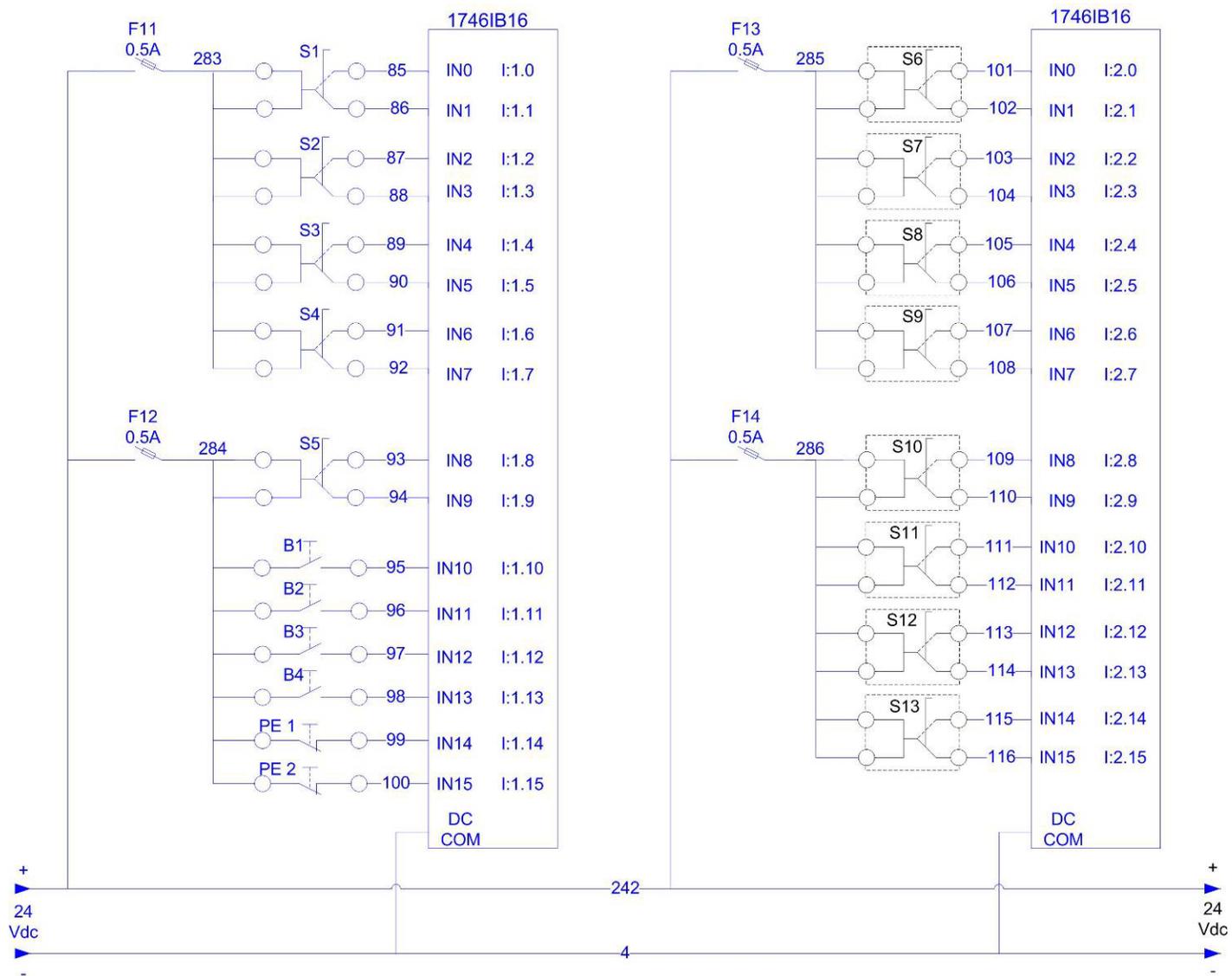


Figura B 4 Circuito de interconexión para módulos de entrada discretos

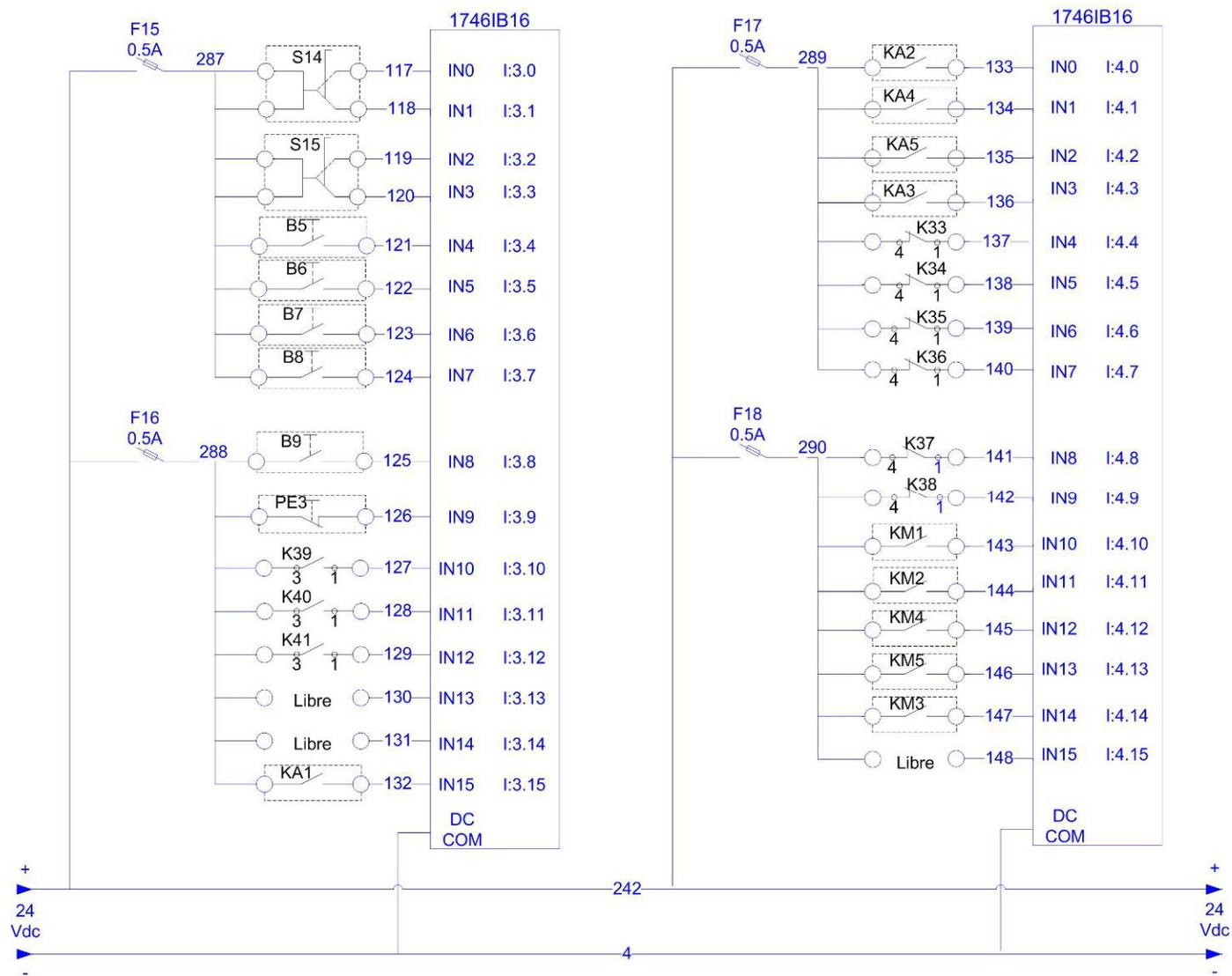


Figura B 5 Circuito de interconexión para módulos de entrada discretos

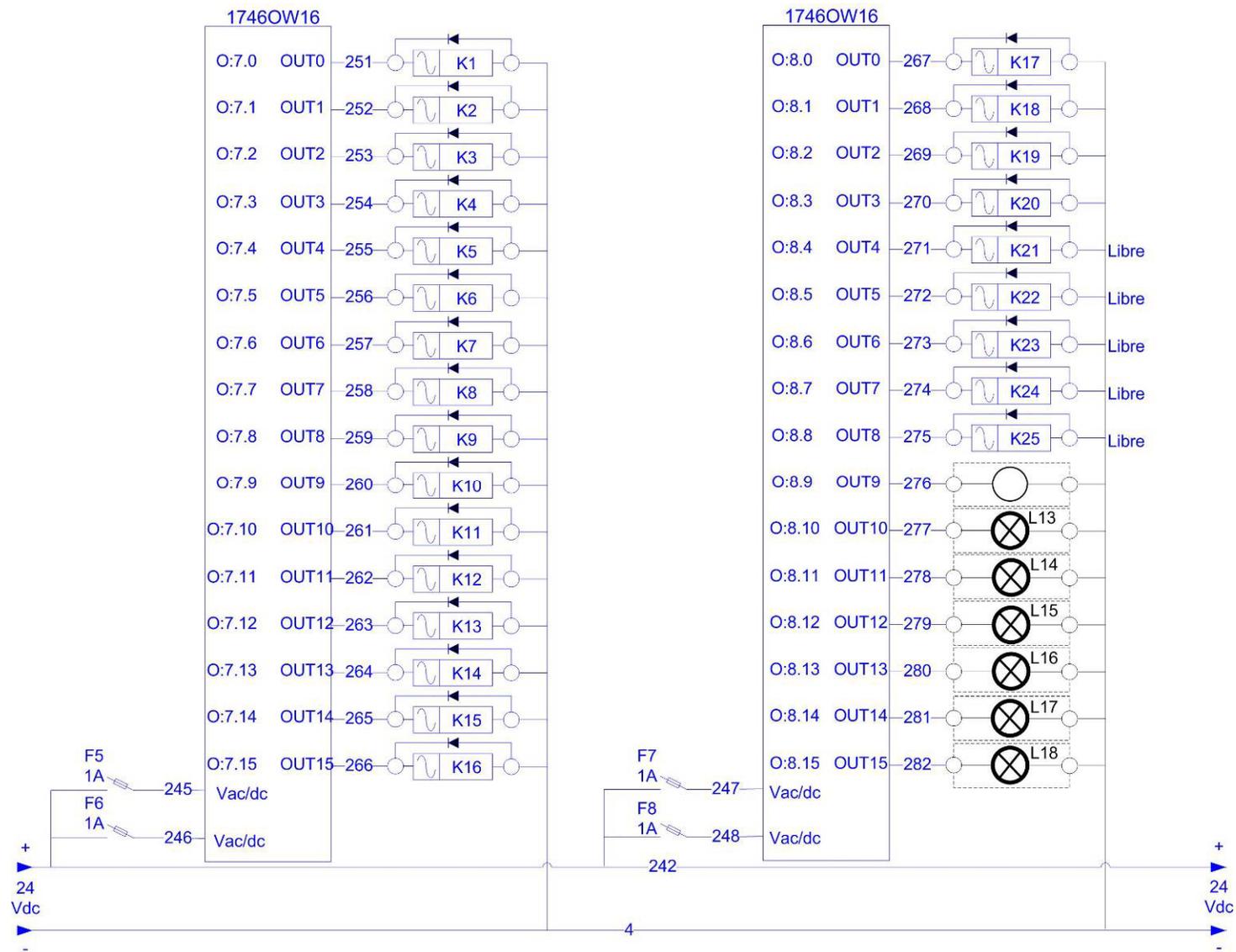


Figura B 6 Circuitos de interconexión para módulos de salida discretos

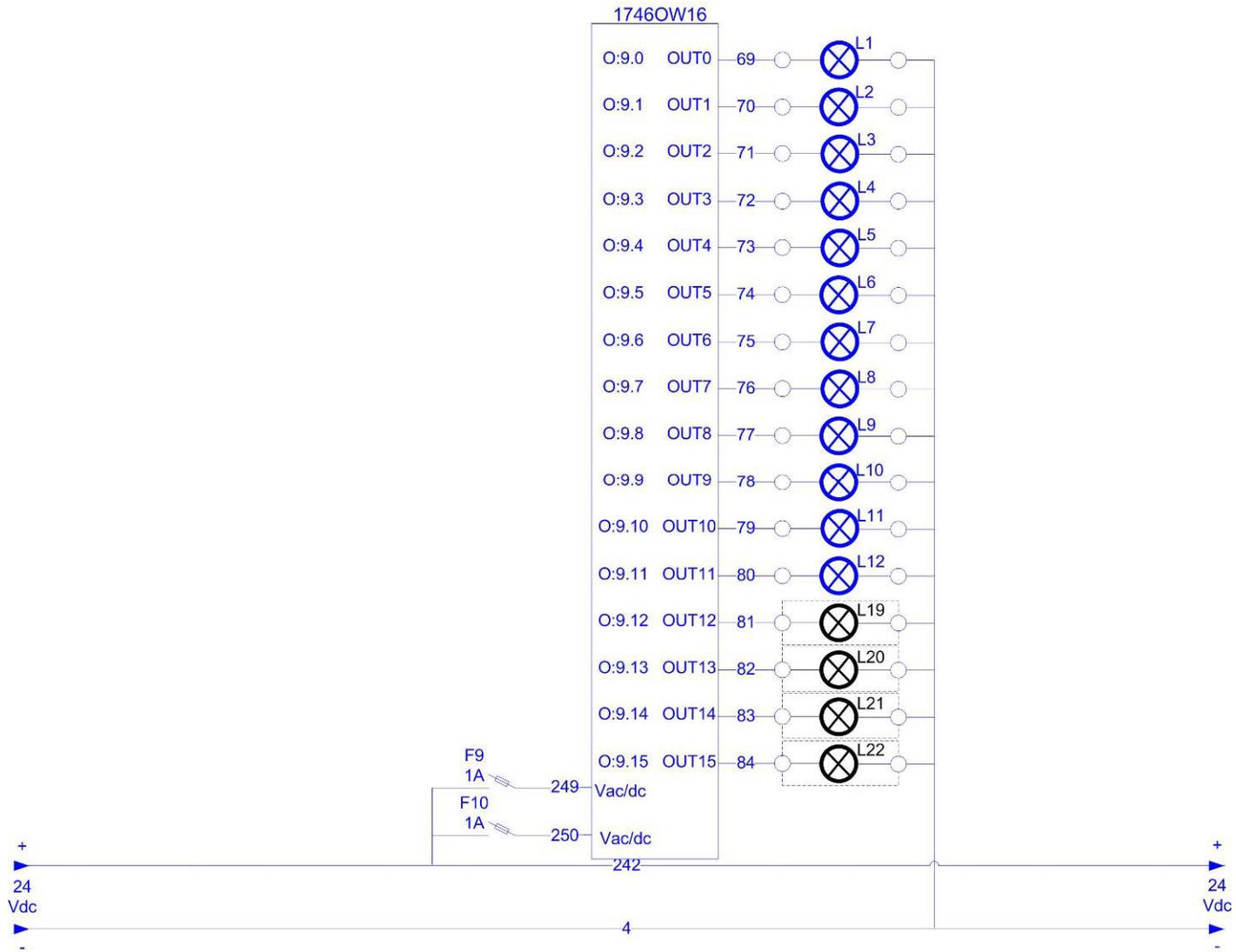


Figura B 7 Circuitos de interconexión para módulos de salida discretos

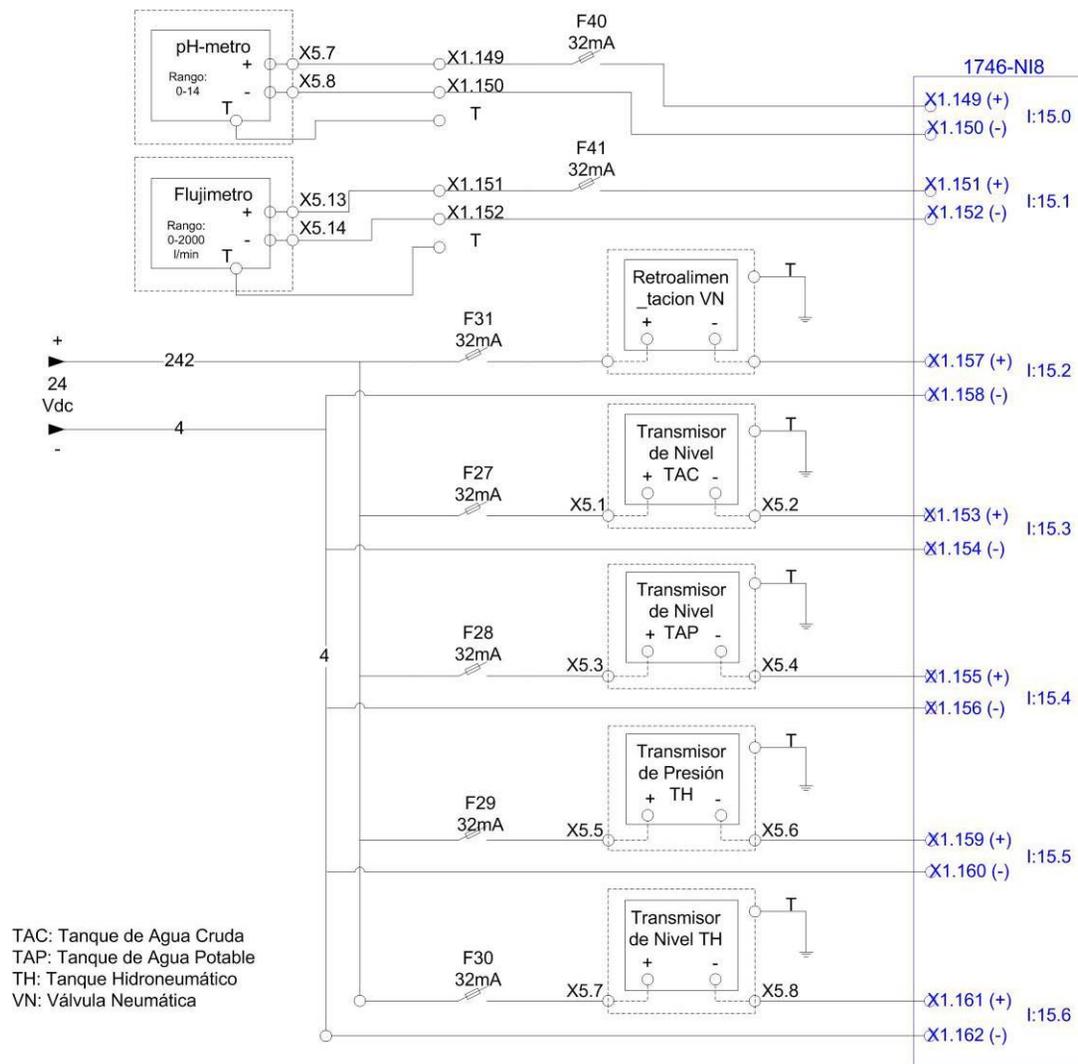


Figura B 8 Circuitos de conexión para el módulo de entradas analógico

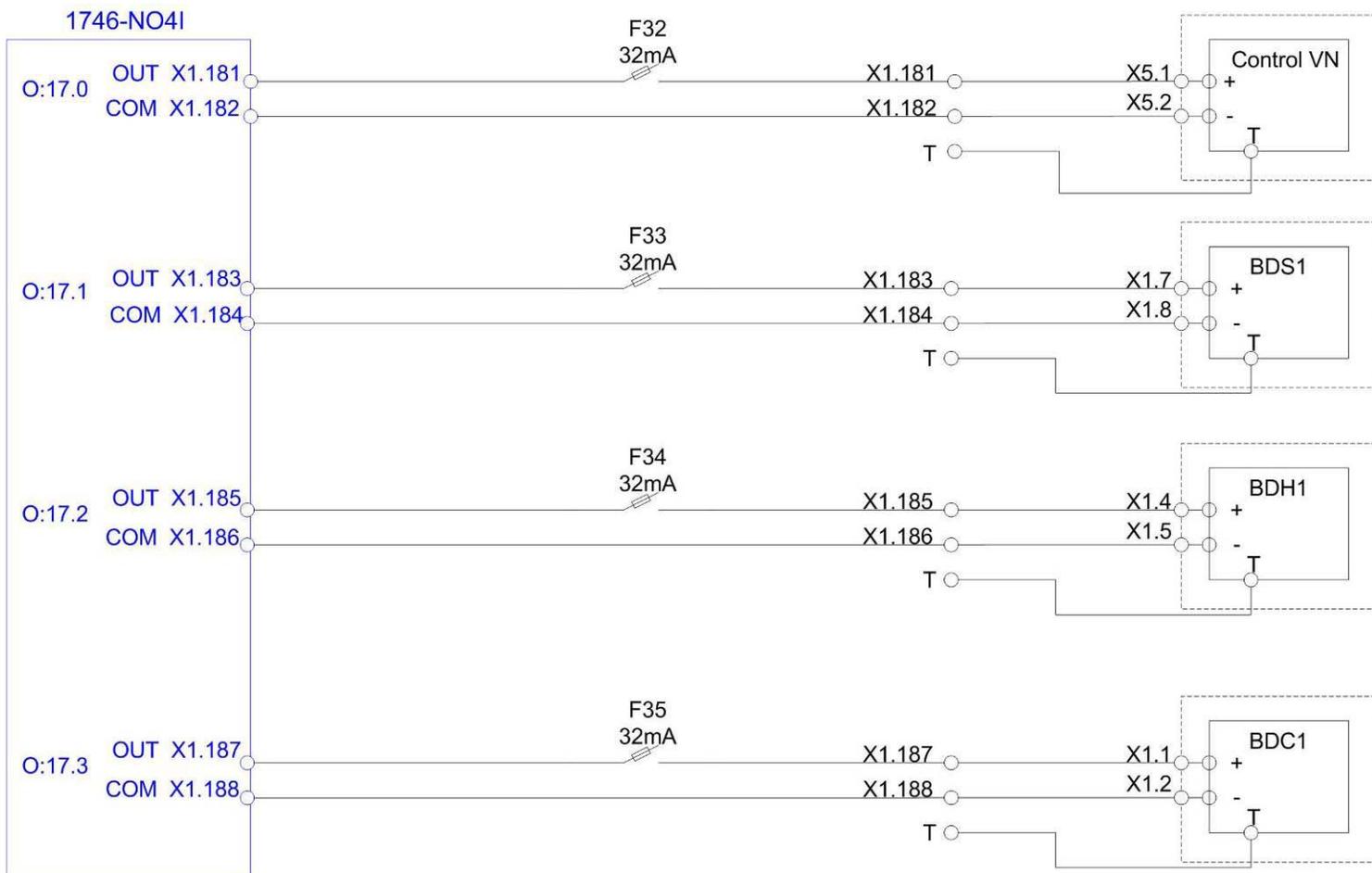


Figura B 9 Circuitos de conexión para el modulo de salidas analógicas

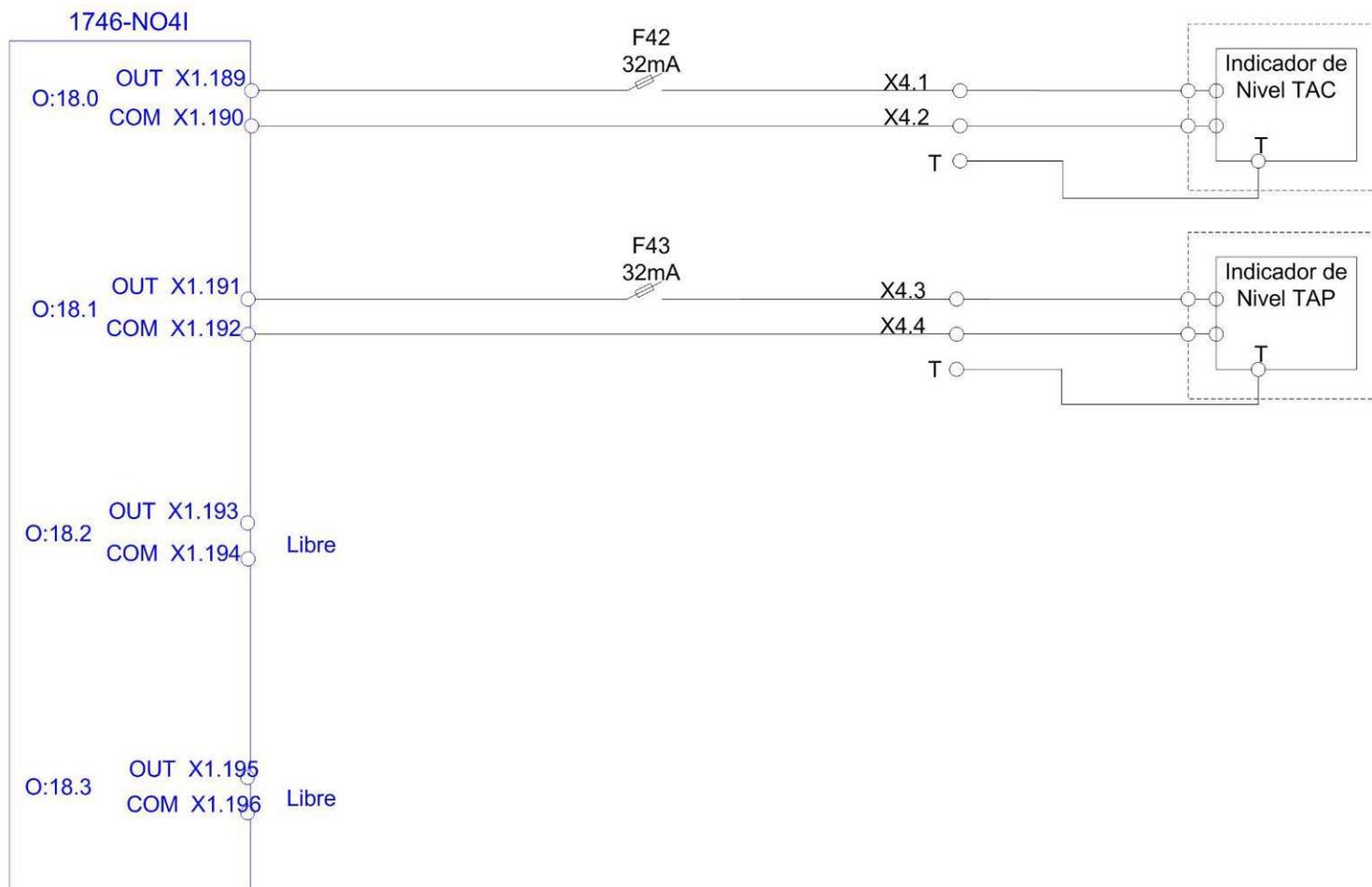


Figura B 10 Circuitos de conexión para el modulo de salidas analógicas

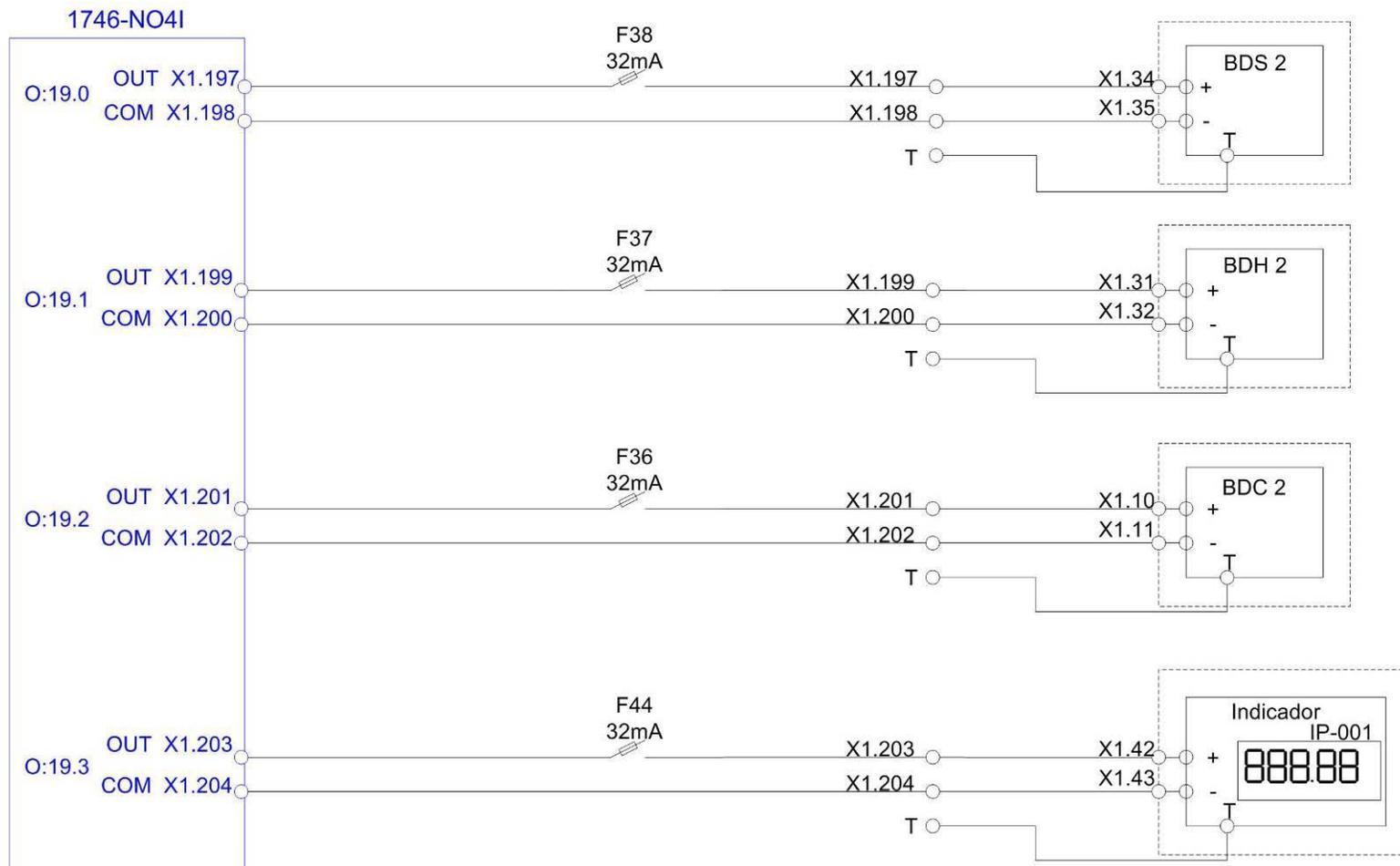
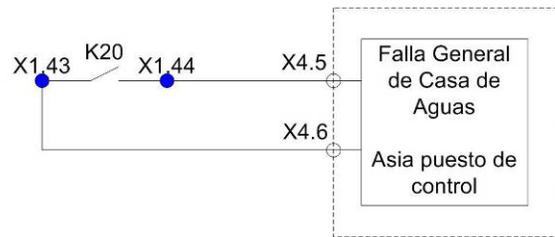
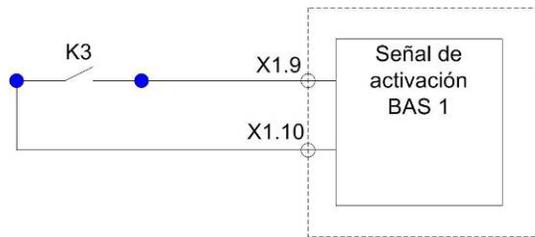
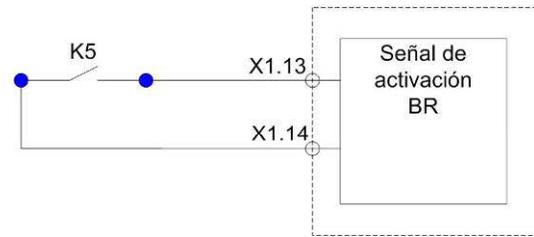
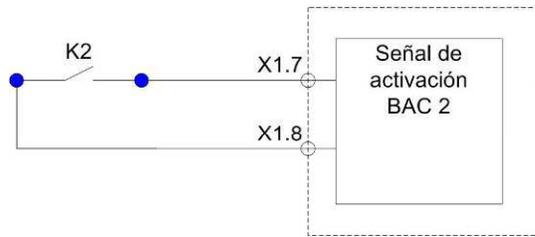
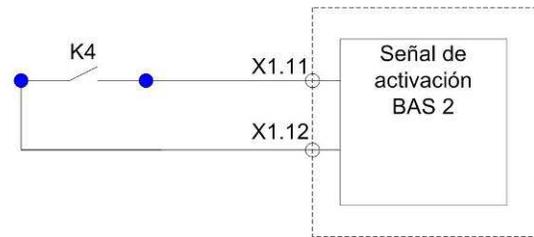
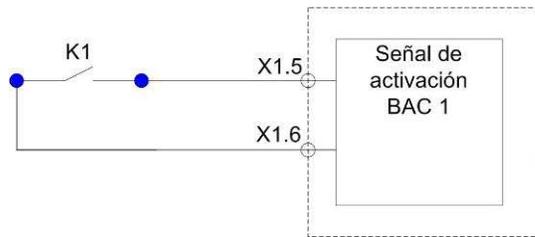


Figura B 11 Circuitos de conexión para el módulo de salidas analógicas



BAC: Bomba de Agua Cruda
 BAS: Bomba de Agua Potable
 BR: Bomba de retrolavado

Figura B 12 Señales de activación de bombas y falla general

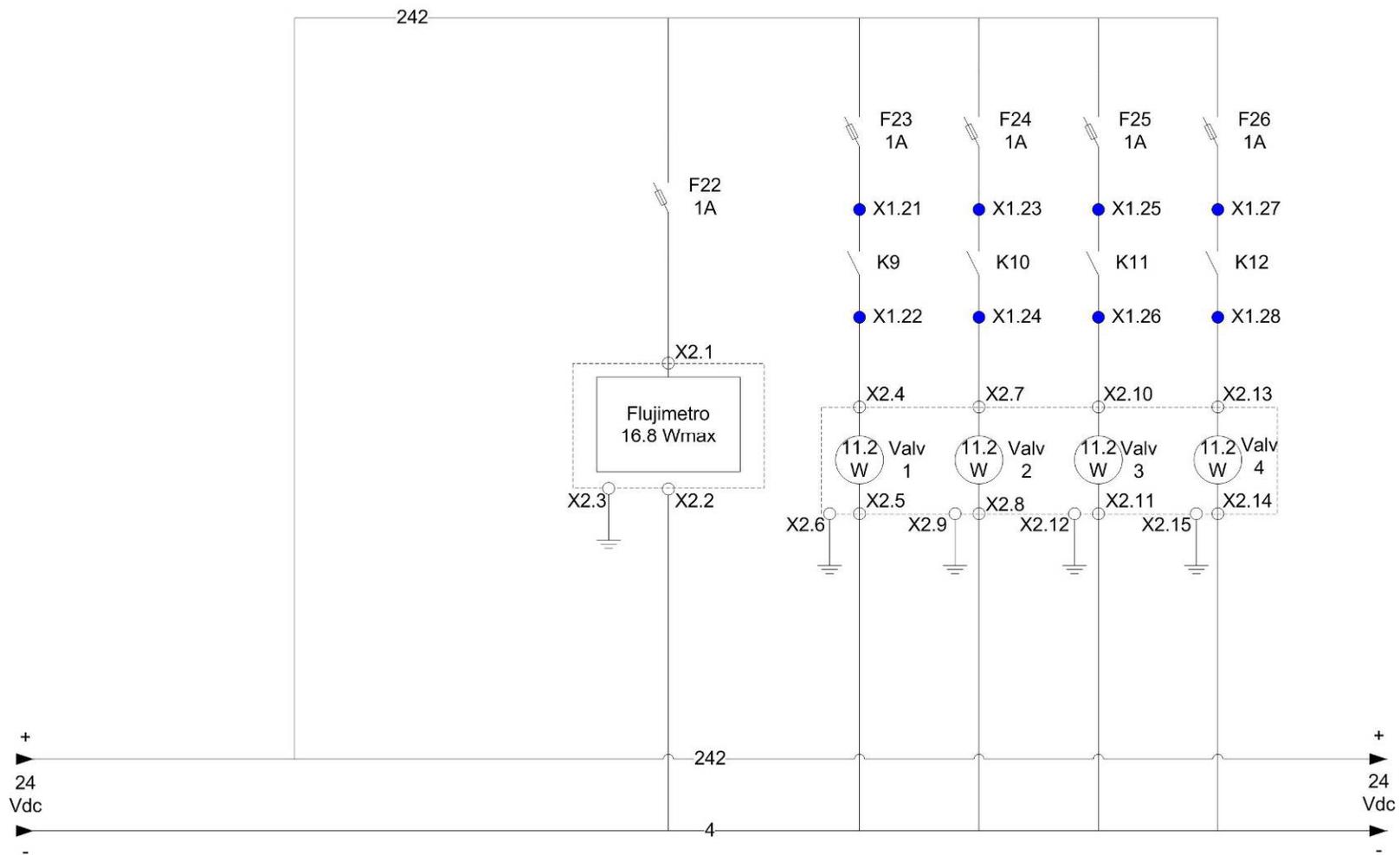


Figura B 13 Circuito de alimentación de 24 V para medidor de flujo y válvulas del filtro de lecho múltiple

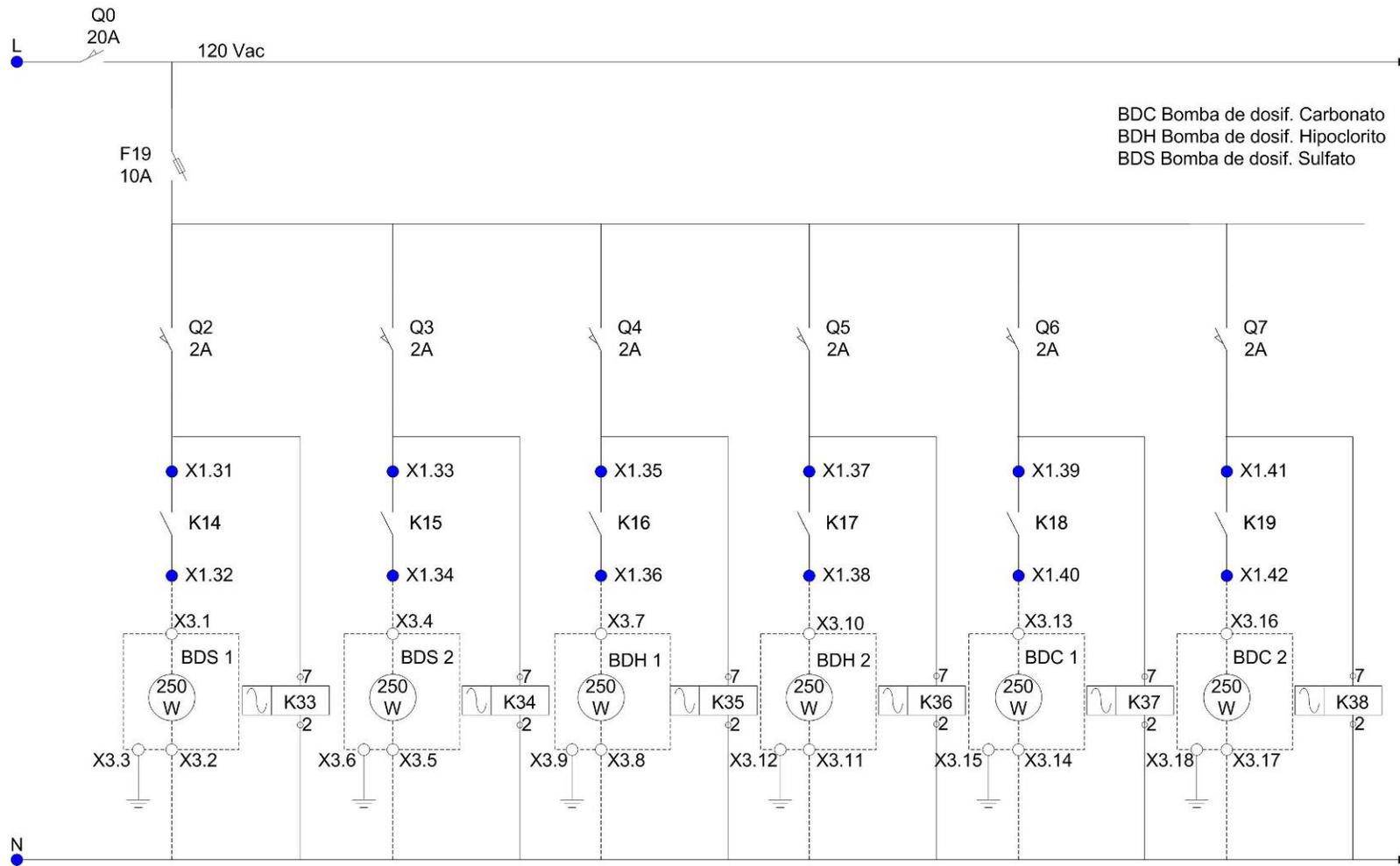


Figura B 14 Circuitos alimentación de 110 V para bombas de dosificación

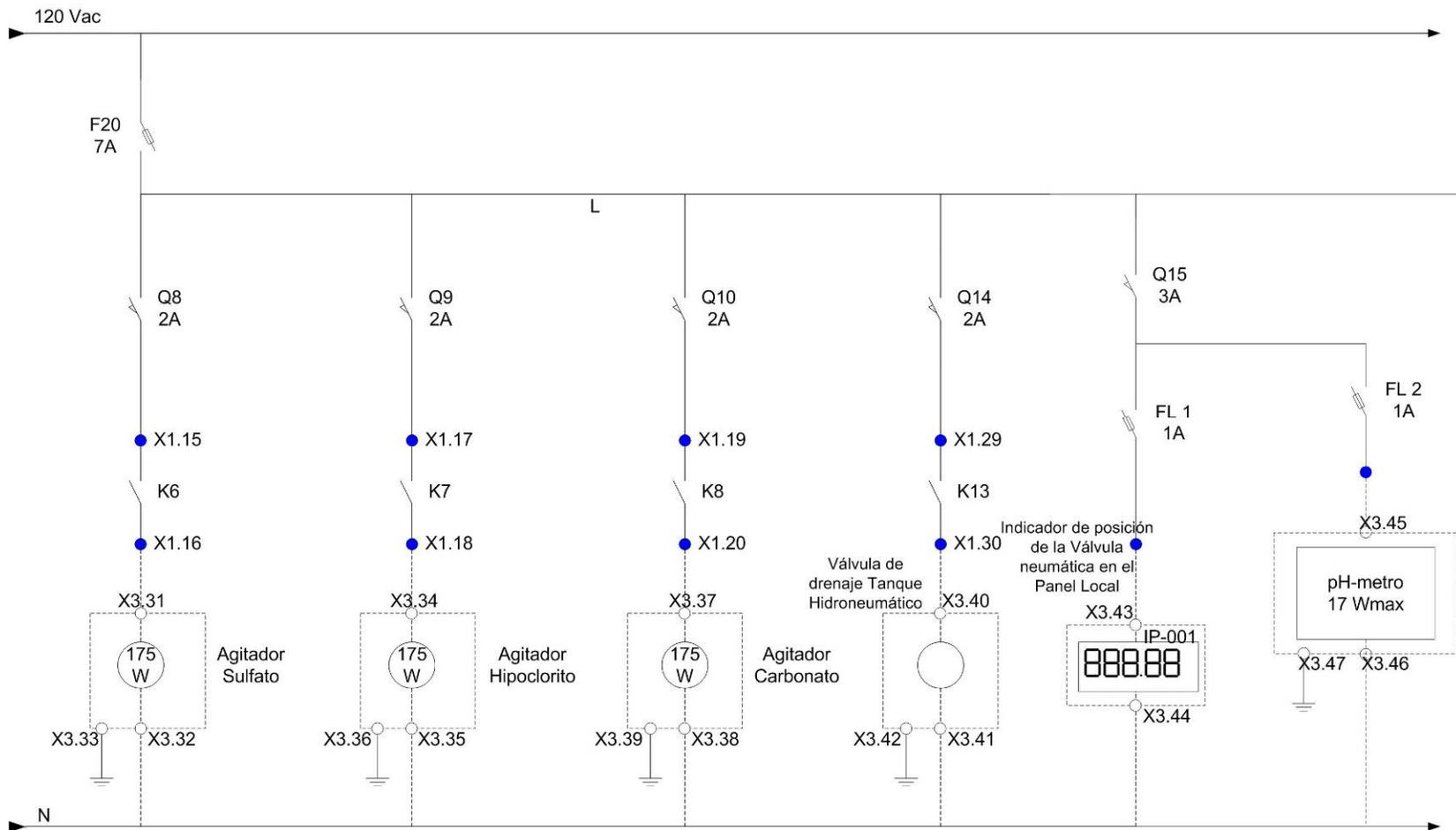


Figura B 15 Circuitos de alimentación de 110V para agitadores, válvula de drenaje, indicador y medidor de pH

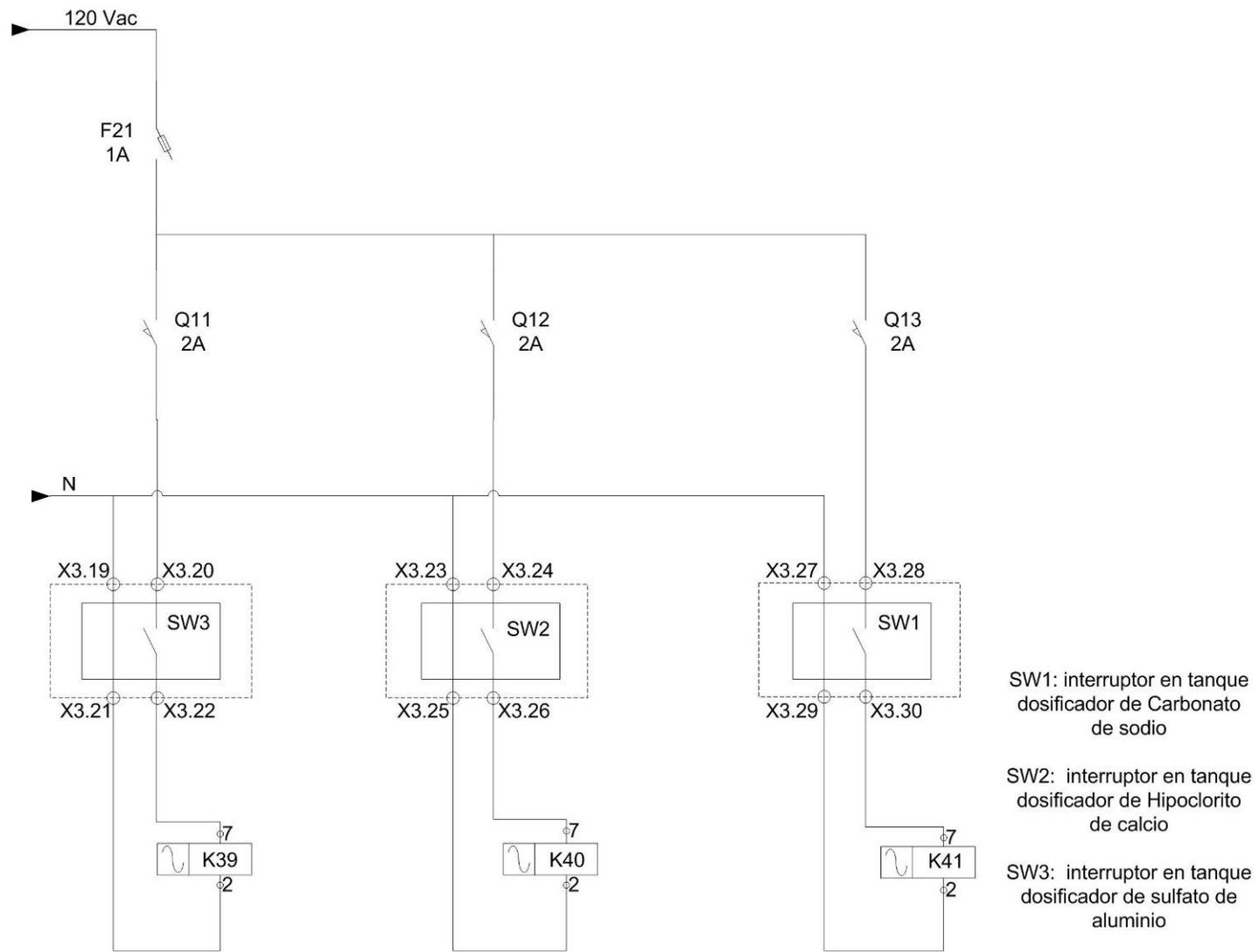


Figura B 16 Circuitos de conexión para los interruptores de nivel de los tanques dosificadores

APÉNDICE C CAPACITACIÓN DE PERSONAL

MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN Y SUMINISTRO DE AGUA

Expositor a cargo: Andrés Sancho Salazar

Justificación

La presente capacitación es parte de los objetivos del proyecto: *Diseño e implementación del sistema de control y monitoreo en el proceso de potabilización del agua*, que se realizó en el Centro de Generación Miravalles durante el periodo de agosto 2004 a marzo 2005.

Como parte de la modernización del sistema de potabilización, se incorporó nuevas tendencias tecnológicas como la utilización de un PLC (Programable Logic Controller) SLC 500 de la marca Allen Bradley. Este dispositivo es el encargado de controlar en su totalidad el sistema de potabilización, por lo que es de vital importancia que el personal a cargo del mismo tenga el conocimiento para resolver cualquier problema que este puede presentar durante su funcionamiento, además de la forma más adecuada de manipulación durante trabajos de mantenimiento y corrección.

Objetivo General

Capacitar al personal encargado del mantenimiento del sistema de potabilización, con el fin de que estos puedan solventar cualquier problema que este presente durante su funcionamiento.

Cronograma:

Día 1. Horario: de 1 a 4:30pm

Temas:

- Circuitos de control y conexión con PLC
- Direccionamiento de variables de campo

Día 2. Horario: de 8 a 11:30am y de 1 a 4:30pm

Temas:

- Principales instrucciones de programación
- Descripción del programa escalera
- Configuración de los controladores de comunicación en RSLinx
- Descarga del programa escalera con RSLogix

Día 3. Horario: de 8 a 11:30am

Temas:

- Búsqueda de fallas por medio de la utilización de herramientas de monitoreo en RSLogix
- Establecimiento de comunicación entre PLC y Wonderware

Anexos

Los circuitos de potencia para el control de las bombas de agua cruda, servicio y retrolavado fueron diseñados por el técnico Teodoro Aguilar. Estos circuitos se encuentran en un panel local de potencia (Figura A 1) de donde se pueden activar manualmente las bombas sin necesidad de intervención del PLC (ver Figura A 2 y Figura A 3).



Figura A 1 Panel Local de potencia

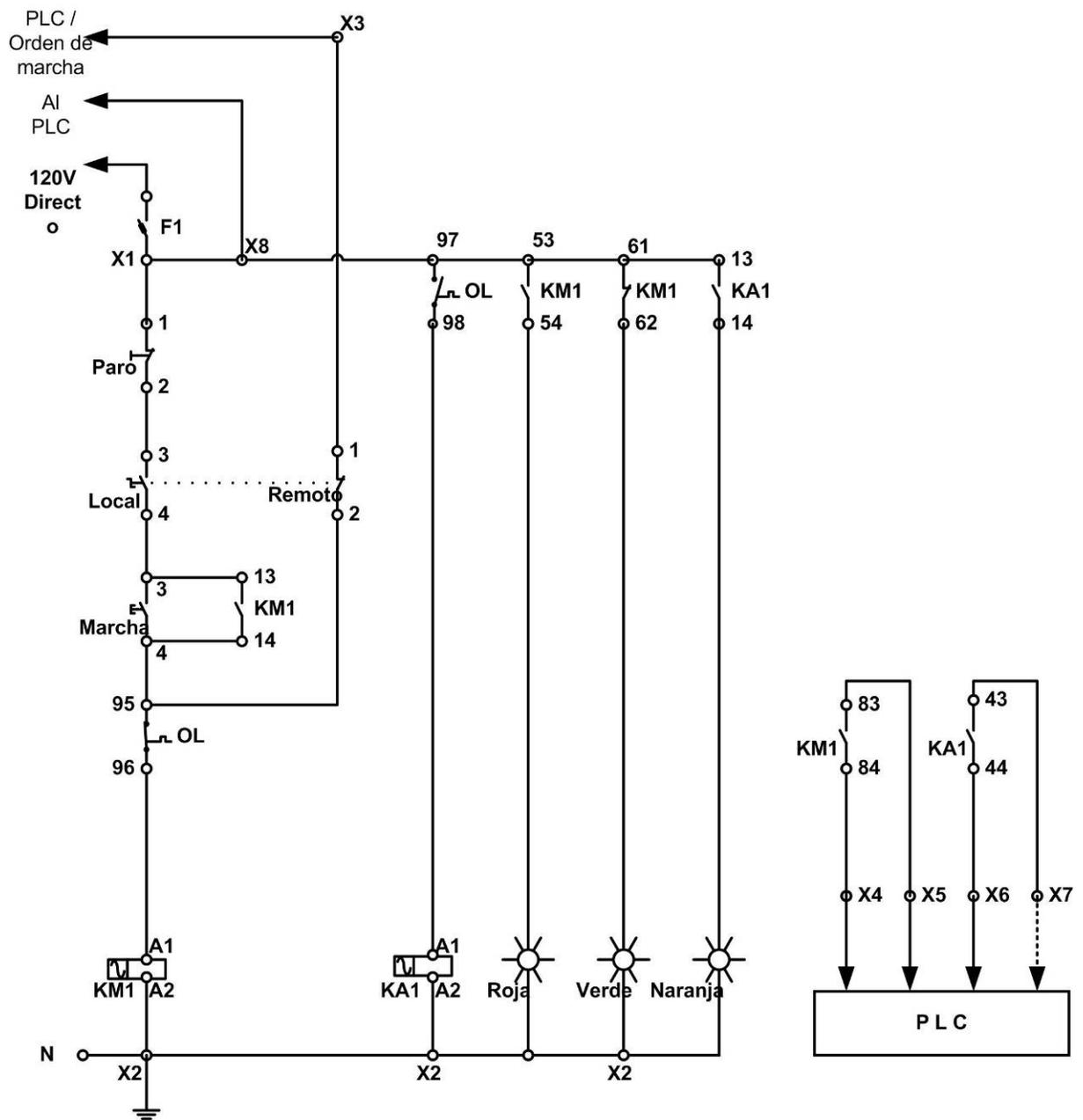


Figura A 2 Circuito de control local para las bombas

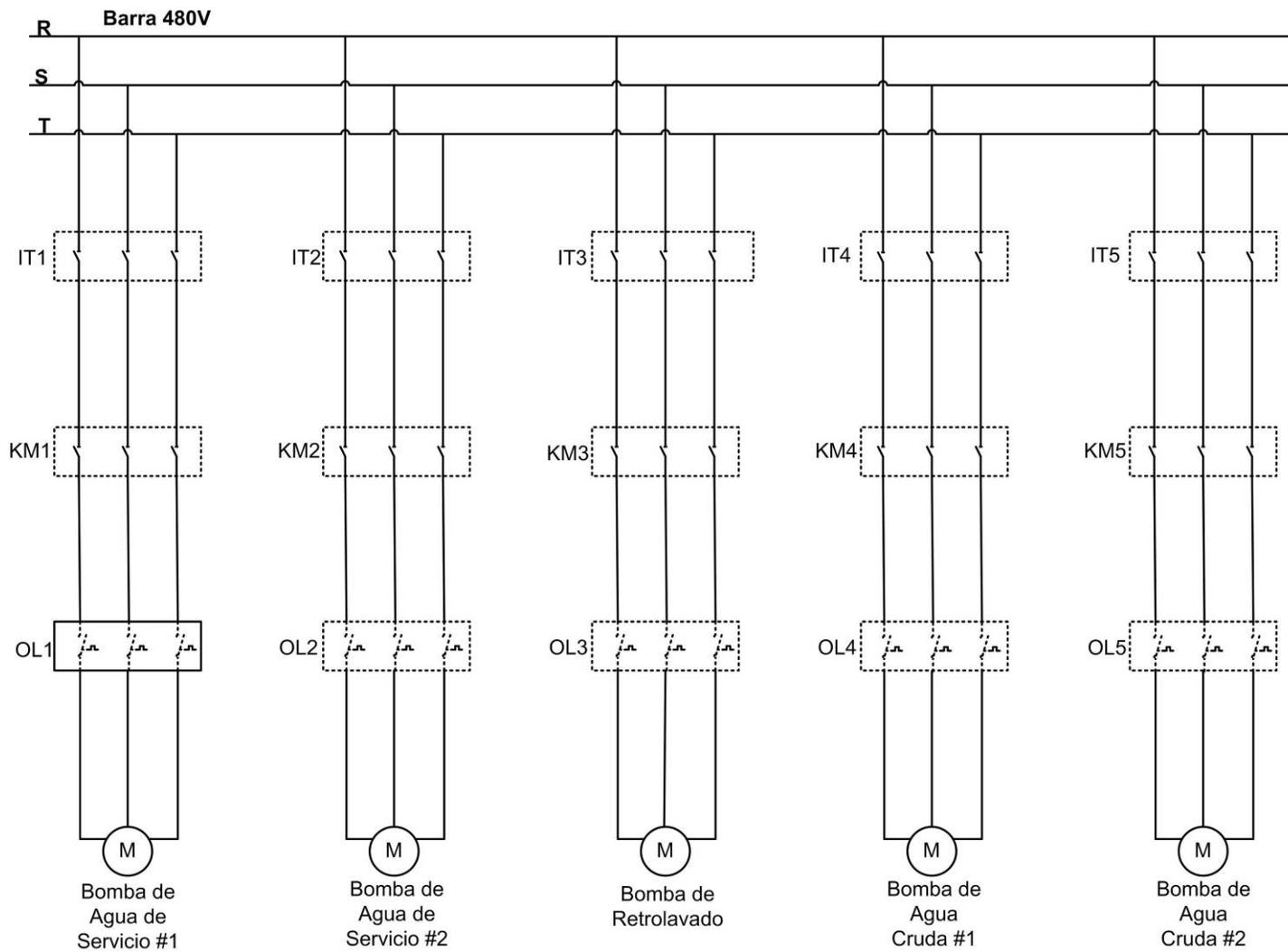


Figura A 3 Circuito de conexión trifásico en el panel de potencia

TCA4-1 RESERVA	TCA4-7 RESERVA	TCA4-13 Bomba Agua Servicio #1	TCA4-18 Fresadora	TCA4	
TCA4-2 GRUA TALLER	TCA4-8 RESERVA	TCA4-14 Bomba Agua Servicio #2	TCA4-19 Torno		TCA4-23 Agua de Servicio #1
TCA4-3 ALMACÉN Deshumedeced or	TCA4-9 TGCA4 110V	TCA4-15 Bomba de Retrolavado	TCA4-20 Compresor de Aire #1		TCA4-24 Agua de Servicio #2
TCA4-4 RESERVA	TCA4-10 Bomba Agua Cruda #2	TCA4-16 Bomba Agua Cruda#1	TCA4-21 Compresor de Aire #2		TCA4-25 Retrolavado
TCA4-5 RESERVA	TCA4-11 Dosificación Miravalles 1	TCA4-17 Banco de Pruebas Taller Eléctrico	TCA4-22 Alimentación Banco de Pruebas		TCA4-26 Agua Cruda #1
TCA4-6 Alimentación Principal TGCA3-6	TCA4-12 Bomba Desechos aceite				TCA4-27 Agua Cruda #2

Figura A 4 Distribución del panel reconrol de potencia